

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**VERIFIKACE PROJEKTŮ MODES PROGRAMEM EMTP-
ATP**

VERIFICATION OF MODES PROJECTS WITH EMTP-ATP

2015

Bc. Oldřich Rychlý

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Oldřich Rychlý**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Verifikace projektů MODES programem EMTP-ATP
Verification of MODES Projects with EMTP-ATP

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Projekty programu MODES.
2. Modely dvou projektů MODES v programu EMTP-ATP.
3. Srovnání modelů projektů v programech MODES a EMTP-ATP.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dokumentace programů MODES a EMTP-ATP.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Věslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

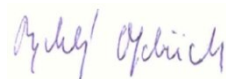



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 6.5.2015



.....
podpis studenta

Poděkování

Tímto děkuji doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za odbornou i metodickou pomoc při zpracování diplomové práce a za přínosné rady při řešení konkrétních problémů.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá simulacemi v elektroenergetice za pomoci programového prostředí MODES a EMTP-ATP. Práce obsahuje rozbor implementovaných projektů v programu MODES. Dva vybrané projekty DIESEL a ISLAND jsou následně zpracovávány a zhodnoceny pomocí softwaru EMTP-ATP. Detailně je uveden rozbor jednotlivých prvků simulačních obvodů. Pro projekt DIESEL jsou vytvořeny i bloky pro regulaci budiče a budič. Výsledky jsou graficky verifikovány s výsledky z MODES. Projekt ISLAND je zpracován v ustáleném stavu a výsledky jsou posouzeny tabulkovou formou z hlediska hodnot napětí, proudů a předávaných výkonů v síti. V poslední části práce je obecné zhodnocení simulačních programů a modelů, s následnou možností zpracování dalších projektů programu MODES právě programem EMTP-ATP.

Klíčová slova

EMTP-ATP, MODES, verifikace, simulace

Abstract

The diploma thesis deals with simulations at electric power engineering with softwares MODES and EMTP-ATP. The diploma thesis contents introduction of all implemented projects in MODES. Two projects (DIESEL and ISLAND) were chosen for verification. These projects are verified with EMTP-ATP. All parts of electrical network are analyzed for simulations in details. DIESEL project contains all standard network parts and especially regulator of exciter and exciter. These are created with special mathematic-logical parts. Solutions of simulation are verified with graphs and compared with solutions of MODES and EMTP-ATP. The project ISLAND is processed in steady state and values of voltages, currents, active and reactive power are compared at tables. In last part of thesis is common evaluation of verified projects and compared MODES and EMTP-ATP. The thesis also deals propriety of other projects at MODES to verified with EMTP-ATP.

Key words

EMTP-ATP, MODES, verification, simulation

Seznam symbolů a značek

| | | |
|-----------------|-----------------------------------|--|
| A_{ss} | (-) | mez sycení generátoru |
| B_s | (-) | mez sycení generátoru |
| C | (μF) | kapacita kondenzátoru |
| C_v | (F) | kapacita vedení |
| C_K | ($\text{F}\cdot\text{km}^{-1}$) | kapacita vedení vztažena na kilometr délky |
| D_s | (m) | střední geometrická vzdálenost vodičů jednotlivých fází mezi sebou v zrcadlení mezi zemí |
| E | (V) | elektromotorická síla |
| E_q | (V) | elektromotorická síla v příčné ose |
| E'_q | (V) | přechodná elektromotorická síla v příčné ose |
| E''_q | (V) | rázová elektromotorická síla v příčné ose |
| E'_d | (V) | přechodná elektromotorická síla v podélné ose |
| E''_d | (V) | rázová elektromotorická síla v podélné ose |
| G_K | ($\text{S}\cdot\text{km}^{-1}$) | admittance vedení vztažena na kilometr délky |
| G_s | (S) | svodová vodivost |
| I_2 | (A) | sekundární proud |
| I_B | (A) | budicí proud |
| $I_{B\max}$ | (-) | maximální nastavená hodnota proudu budiče |
| $I_{\check{c}}$ | (A) | proud činného charakteru |
| I_G | (A) | proud generátoru |
| $I_{G\max}$ | (-) | maximální nastavená hodnota proudu generátoru |
| I_N | (A) | jmenovitý proud |
| I_Z | (-) | poměrná hodnota záběrného proudu |
| I_z | (-) | záběrný proud asynchronního motoru |
| J_N | ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) | jmenovitý moment setrvačnosti |
| K_a | (-) | zesílení budiče |
| K_p | (-) | proporcionální zesílení regulátoru |
| K_{se} | (-) | zesílení derivační zpětné vazby regulátoru |
| K_{stat} | (-) | statika kompenzace jalovým proudem |
| L | (H) | indukčnost |
| L_C | (H) | celková indukčnost |
| L_K | ($\text{H}\cdot\text{km}^{-1}$) | indukčnost vedení vztažena na kilometr délky |
| M_N | ($\text{N}\cdot\text{m}$) | jmenovitý moment |
| M_{ZAT} | ($\text{N}\cdot\text{m}$) | zatěžovací moment |
| P | (W) | činný výkon |
| P_{Kn} | (W) | jmenovité ztráty nakrátko |
| P_N | (W) | jmenovitý činný výkon |
| P_T | (W) | výkon transformátoru |

| | | |
|------------|-----------------------------------|--|
| Q | (var) | jalový výkon |
| Q_G | (var) | jalový výkon generátoru |
| R | (Ω) | činný odpor |
| R_1 | (-) | odpor vinutí statoru v AM |
| R_2 | (-) | odpor vinutí rotoru při skluzu 1 v AM |
| R_3 | (-) | odpor vinutí rotoru při jmenovitém skluzu v AM |
| R_B | (-) | výstup regulátoru buzení |
| R_K | ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$) | činný odpor vedení vztažen na kilometr délky |
| R_T | (Ω) | činný odpor transformátoru |
| R_V | (Ω) | činný odpor vedení |
| S_n | (V·A) | jmenovitý zdánlivý výkon |
| S_p | (V·A) | přirozený výkon |
| S_{Tn} | (V·A) | jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru |
| T_1 | (s) | časová konstanta předstihu člunku "lead/lag" |
| T_2 | (s) | druhá časová konstanta předstihu člunku "lead/lag" |
| T_3 | (s) | časová konstanta zpoždění člunku "lead/lag" |
| T_4 | (s) | druhá časová konstanta zpoždění člunku "lead/lag" |
| T_d | (s) | podélná přechodná časová konstanta na prázdkno |
| T_d'' | (s) | podélná rázová časová konstanta na prázdkno |
| T_I | (s) | časová konstanta integrační části regulátoru |
| T_{iOM} | (s) | integrační časová konstanta omezovače |
| T_m | (s) | mechanická časová konstanta stroje |
| T_{OM} | (s) | časová konstanta zpoždění působení omezovače |
| T_q | (s) | příčná přechodná časová konstanta na prázdkno |
| T_q'' | (s) | příčná rázová časová konstanta na prázdkno |
| U | (V) | elektrické napětí |
| U_2 | (V) | napětí na konci vedení |
| U'_{ab} | (V) | fázor napětí mezi fází a a b |
| U'_{bc} | (V) | fázor napětí mezi fází b a c |
| U_{Bmax} | (-) | maximální (nárazové) budící napětí |
| U_{Bmin} | (-) | minimální (nárazové) budící napětí |
| U'_{ca} | (V) | fázor napětí mezi fází c a a |
| U_f | (V) | fázové napětí |
| U_G | (V) | napětí na generátoru |
| U_{Imax} | (-) | maximální hodnota omezení odchylky regulátoru buzení |
| U_{Imin} | (-) | minimální hodnota omezení odchylky regulátoru buzení |
| U_K | (-) | napájecí napětí budiče |
| U_N | (V) | jmenovité napětí |
| U_{nec} | (-) | necitlivost regulátoru |

| | | |
|-----------------|-------------------------|--|
| U_{OMmax} | (-) | maximální hodnota výstupu |
| U_{OMzad} | (-) | nastavení omezovače |
| U_{Rmax} | (-) | maximální výstupní napětí regulátoru |
| U_{Rmin} | (-) | minimální výstupní napětí regulátoru |
| U_{ST} | (V) | hodnota napětí vlivem statiky generátoru |
| U_{Tn} | (V) | jmenovité napětí transformátoru |
| U_{V150} | (V) | vztažná hladina napětí 150kV v síti |
| U_{V380} | (V) | vztažná hladina napětí 380kV v síti |
| U_{V70} | (V) | vztažná hladina napětí 70kV v síti |
| U_{Zmax} | (-) | maximální zadané napětí regulátoru |
| U_{Zmin} | (-) | minimální zadané napětí regulátoru |
| X''_d | (-) | druhá přechodná (rázová) nesycená podélná reaktance |
| X_1 | (-) | indukčnost statoru v AM |
| X_2 | (-) | indukčnost rotoru při skluzu 1 v AM |
| X_3 | (-) | indukčnost rotoru při jmenovitém skluzu v AM |
| X_d | (-) | podélná synchronní nesycená reaktance |
| X'_d | (-) | prvá přechodná nesycená podélná reaktance |
| X_q | (-) | příčná synchronní nesycená reaktance |
| X'_q | (-) | prvá přechodná nesycená příčná reaktance |
| X_s | (Ω) | synchronní reaktance |
| X_T | (Ω) | reaktance transformátoru |
| X_V | (Ω) | indukční reaktance vedení |
| Y_K | (S) | admitance vedení vztažena na kilometr délky |
| Z_K | (Ω) | impedance vedení vztažena na kilometr délky |
| Z_{Tn} | (Ω) | jmenovitá impedance transformátoru |
| Z_V | (Ω) | vlnová impedance vedení |
| a | (m) | vzdálenost středů vodičů mezi sebou |
| $\cos\varphi_N$ | (-) | jmenovitý účinník |
| d_s | (m) | střední geometrická vzdálenost mezi vodiči |
| f | (Hz) | frekvence |
| k_c | (-) | koeficient citlivosti |
| k_D | (-) | koeficient úbytku napětí způsobený reakce kotvy pomocného budiče |
| k_G | (-) | zpětná vazba mezi napětím budiče a řídicím napětím regulátoru |
| k_{IA} | (-) | zesílení činného výkonu pro regulaci |
| k_{IR} | (-) | zesílení jalového výkonu pro regulaci |
| k_{zat} | (-) | koeficient zatížení |
| m | (m) | vzdálenost vedení od země |
| n_N | (ot·min ⁻¹) | jmenovité otáčky stroje |

| | | |
|--------------|-------------------------|---|
| n_S | (ot·min ⁻¹) | synchronní otáčky stroje |
| p | (-) | počet pólů |
| p_{KON} | (-) | převod transformátoru v koncovém uzlu |
| p_P | (-) | poměrný převod transformátoru |
| p_T | (-) | převod transformátoru |
| r | (m) | poloměr vodiče |
| r'_R | (Ω) | činný odpor rotorového vinutí přepočítaný na stator |
| r_S | (Ω) | činný odpor statorového vinutí |
| $\sin\delta$ | (-) | sinus zátěžného úhlu generátoru |
| s_G | (-) | skluz generátoru při přechodném ději |
| s_N | (-) | jmenovitý skluz stroje |
| s_U | (Hz) | odchylka frekvence od jmenovité hodnoty |
| u_k | (-) | napětí nakrátko |
| v | (m·s ⁻¹) | rychlost změny zadaného napětí regulátoru |
| x'_R | (Ω) | indukčnost rotorového vinutí přepočítaná na stator |
| x_S | (Ω) | indukčnost statorového vinutí |
| ΔP | (W) | Činné ztráty |
| ΔP_Q | (W) | ztráty způsobené přenosem jalového výkonu |
| ΔP_S | (W) | Činné svodové ztráty |
| ΔP_T | (W) | Činné ztráty transformátoru |
| ω_N | (rad·s ⁻¹) | jmenovitá úhlová rychlost |
| MODES | | síťový simulátor pro modelování elektrizačních soustav |
| EMTP-ATP | | obvodový simulátor pro simulaci přechodných dějů |
| TACS | | matematická procedura pro zpracování řídicích veličin v ATP |
| MODELS | | programovací jazyk v EMTP-ATP |
| UPFC | | univerzální regulátor výkonových toků |
| CIGRE | | testovací přenosová síť uznaná mezinárodní organizací elektroinženýrů |
| HRT | | hladinový regulátor napětí |
| IEEE | | institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství |
| UPS | | záložní napájecí systém |
| STAB | | stabilizátor v regulaci buzení |
| HMP | | hlídač meze podbuzení |
| OMEZ | | omezovač proudů |
| „lead-lag“ | | obvod pro posunutí fáze |
| ST_3 | | typ budiče synchronního stroje dle metodiky IEEE |
| SM59 | | model synchronního stroje v EMTP-ATP |
| HICO | | moment setrvačnosti |

Seznam obrázků:

| | |
|--|----|
| Obr 2.1 Schématické znázornění dodávky výkonu přes generátor [6] | 6 |
| Obr 2.2 Vektorový diagram synchronního generátoru [6] | 6 |
| Obr 2.3 Generátor v EMTP-ATP model SM59 | 9 |
| Obr 2.4 Schématické znázornění transformátoru pro modelování v síti Γ -článkem [6] | 9 |
| Obr 2.5 Schématické znázornění transformátoru pro modelování v síti Π –článkem [6] | 10 |
| Obr 2.6 Model transformátoru v EMTP-ATP s RL prvky | 11 |
| Obr 2.7 Model vedení v EMTP-ATP (Π -článek) | 14 |
| Obr 2.8 Model zátěže včetně kompenzace v EMTP-ATP | 15 |
| Obr 2.9 Náhradní schéma AM [7] | 16 |
| Obr 2.10 Asynchronní motor s doplňujícími prvky | 19 |
| Obr 2.11 Ilustrační graf zatěžovacího momentu poháněného zařízení | 19 |
| Obr 2.12 Průběh zatěžovacího momentu poháněného zařízení | 20 |
| Obr 2.13 Zjednodušené systémy Buzení STAN a CONS | 21 |
| Obr 2.14 Model budiče ST_3 v MODES [10] | 22 |
| Obr 2.15 Schéma regulátoru buzení | 23 |
| Obr 2.16 Vektorový diagram stabilizátoru napětí pro regulaci buzení [10] | 24 |
| Obr 2.17 Schéma omezovače proudů | 25 |
| Obr 2.18 Schéma budiče v EMTP-ATP | 25 |
| Obr 2.19 Schéma regulátoru buzení v EMTP-ATP | 26 |
| Obr 2.20 Omezovač proudů v EMTP-ATP | 26 |
| Obr 3.1 Průběh proudu asynchronního motoru při rozběhu bez zatížení | 31 |
| Obr 3.2 Průběh proudu generátoru při rozběhu AM na prázdko | 31 |
| Obr 3.3 Průběh proudů z generátoru v ustáleném stavu | 32 |
| Obr 3.4 Průběh proudů z generátoru při zkratu | 33 |
| Obr 3.5 Průběh napětí z generátoru při zkratu | 33 |
| Obr 3.6 Průběh napětí z generátoru při skokové změně zatížení | 34 |
| Obr 3.7 Průběh proudů z generátoru při skokové změně zatížení | 35 |
| Obr 3.8 Průběh napětí při skokové změně zatížení | 36 |
| Obr 3.9 Průběh proudu při skokové změně zatížení | 36 |
| Obr 3.10 Průběh momentu asynchronního motoru při rozběhu | 37 |
| Obr 3.11 Průběh skluzu asynchronního motoru při rozběhu | 37 |
| Obr 3.12 Průběh proudu asynchronního motoru při rozběhu | 38 |
| Obr 4.1 Schéma sítě v projektu ISLAND | 39 |

Obsah:

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 1 |
| 1 Projekty programu MODES | 2 |
| 2 Modelování jednotlivých prvků elektrizační soustavy | 6 |
| 2.1 Synchronní generátor | 6 |
| 2.2 Transformátor | 9 |
| 2.3 Vedení..... | 12 |
| 2.4 Zátěž | 14 |
| 2.5 Motor | 16 |
| 2.6 Budič..... | 20 |
| 2.7 Spalovací motor..... | 27 |
| 3 Diesel-generátor | 28 |
| 3.1 Projekt DIESEL..... | 28 |
| 3.2 Parametry jednotlivých bloků | 29 |
| 4 Projekt ISLAND | 39 |
| 4.1 Prvky sítě | 40 |
| 4.2 Výsledky | 44 |
| 5 Srovnání modelů projektů MODES a EMTP-ATP | 47 |
| Závěr | 49 |
| Seznam příloh..... | 52 |

Úvod

Diplomová práce se zabývá verifikováním elektrizačních soustav, pomocí softwarových simulací. Simulační modely poskytují názorné chování systému. Jedná se bezpochyby o nezastupitelnou proceduru pro navrhování či analýzu systému. V elektroenergetice rozumíme systémem elektrizační síť, popřípadě dílčí částí sítě, které je potřeba analyzovat. Numerické či grafické výsledky nám mohou být zdrojem pro další navrhování, rekonstrukci či řízení sítě. Vzhledem k tomu, že tvorba simulačních modelů je při řešení praktických problémů značně náročnou problematikou, je na následujících stránkách popsáno, jak lze k tvorbě simulačních modelů přistupovat.

V oblasti elektroenergetiky existuje mnoho speciálních softwarů pro simulování elektrizačních soustav. Softwary se liší podle toho, co mají za úkol sledovat např. ustálený stav, přechodné děje pomalé, přechodné děje rychlé. V této práci bude rozebráno simulování v programech MODES a EMTP-ATP. MODES je software pro simulování přechodných dějů středně rychlých a pomalých. Dominantou programu je možnost simulovat prvky elektráren a zejména strojů pro vstupní výkon generátorů (kotle, turbíny, atd.). Další velmi propracovanou částí jsou regulátory buzení a výkonu, hladinové regulace napětí transformátorů, či automatická regulace napětí. Software EMTP-ATP je vhodný zejména pro rychlé přechodné děje typu zkrat. Dominantou je znázornění okamžitých průběhů sledovaných veličin v čase. V tomto softwaru jsou velmi propracované části tvořící přenos a rozvod elektrické energie a také prvky modelující elektrické stroje. Výhodou EMTP-ATP je možnost naprogramování si vlastních prvků na základě matematického popisu. K tomuto účelu je program vybaven programovatelnými prvky TACS a MODELS. TACS procedura je složena z mnoha matematicko-logických prvků, jejímž spojováním můžeme získat požadovaný model. Nevýhodou TACS je jednoznačně nepřehlednost a složitost při značném počtu použitých prvků. Prvky MODELS jsou programovány na základě jazyka Pascal. Jedná se tedy o standartní programovací kód, kterým si můžeme definovat prvky elektrizační soustavy. Struktura programovacího kódu je velmi přehledná a logická.[12]

Úkolem této práce je provést verifikaci projektů v programu MODES programem EMTP-ATP. Jedná se tedy o vytvoření modelu částí elektrizačních soustav, které jsou simulovány v MODES do programu EMTP-ATP.

1 Projekty programu MODES

3W_TRANS

Prvním projektem simulovaným v programu MODES je projekt trojvinutového transformátoru. Je zde naznačeno, jak lze modelovat trojvinutová trať a jak pracovat v zadávání parametrů, následně jednoduchými zásahy je zkoumána odezva. Celkem je vytvořeno 11 případů, kde je simulováno několik základních zásahů a poruch, které jsou v reálném provozu časté. Zásahy, které jsou prováděny je například vypínání jednotlivých vinutí od napájení a dále zkrat na jednotlivých vinutích. Speciálním případem je degenerace trojvinutového trať na 2 dvouvinutová pro změnu odbočky. Další možností je zadávat dvouvinutová trať do tabulky jako trojvinutová pro případ přepínání odboček, aby program nemusel přepočítávat změnu převodu. Simulované modely zobrazují skokovou změnu napětí na základě přepnutí aktuální odbočky. Zajímavostí v projektu je simulace dvou reálných transformátorů T401 a T402 v paralelní spolupráci z jedné napájecí přípojnice 400 kV. [12]

DIESEL

V této simulaci je řešena problematika napájení soustavy pomocí autonomního zdroje diesel-generátoru. Autor vytvořil celkem 7 případů, kdy jsou zkoumány především nejčastěji vznikající přechodné jevy, jakými jsou:

- rozběh asynchronního motoru napájeného diesel-generátorem při chodu naprázdno, při brždění vlivem uzavření přívodu paliva a změnou typových parametrů.
- skoková změna zatížení jalového i činného charakteru
- zkrat na diesel-generátoru

Simulační model vychází z případu ustáleného stavu a v jednotlivých následujících případech zkoumá, dle vybraných zásahů chování celého systému. Vzhledem k tomu, že v MODESU je vytvořen komplexní budicí systém a pro regulaci a dodávku výkonu spalovací dieselový motor, je DIESEL značně propracovaným modelem. Je zde například možno velmi komplexně sledovat vliv dodávky výkonu na síť, zejména pak při přechodných dějích a schopnost řízení diesel-generátoru jako autonomního zdroje, pro udržení chodu při zkratech. Součástí této práce je projekt verifikován programem EMTP-ATP. [12], [13]

FACTSMOD

Projekt se zabývá modelováním pružných přenosových systémů střídavého proudu FACTS (Flexible AC Transmission System). [10], [19]

Je zde zobrazena síť s využitím proměnného přenosu elektrické energie za pomoci střídavého proudu. Systém obsahuje prvky výkonové elektroniky pro řízení parametrů přenosové soustavy za účelem zvýšení říditelnosti a větší přenosové schopnosti. Klíčovým prvkem je UPFC (Unified power flow controller). Jedná se o zařízení sloužící k rychlé kompenzaci jalového výkonu v přenosových sítích, za účelem lepší využitelnosti přenosové schopnosti. Z obecného hlediska se

jedná o regulátor výkonových toků, kde podle zadané a skutečné hodnoty napětí v počátečním uzlu a podle regulační odchylky mění hodnotu odebíraného jalového výkonu. Pro testování UPFC je vytvořena elektrizační síť na napěťové hladině 230 kV do které pracují 4 generátory. UPFC je instalován na jedné větvi paralelního vedení. Postupně v jednotlivých případech je testováno chování prvku při změně P , Q a U při zkratu, i při běžném provozu. [12], [19]

ISLAND

Jedním z nejvíce zajímavých projektů v programu MODES je model elektrizační soustavy v přechodu do ostrovního režimu, řízení provozu v ostrovním režimu a následně přiřazování k tvrdé síti. Opět je zde mnoho případů, které se můžou vyskytnout v elektrizační soustavě, a pomocí simulačního modelu je ukázáno, jak se daná síť bude chovat. Pro příklad uvedu stručně některé z nich:

- Přechod do deficitního ostrova v primární regulaci – V simulaci je naznačena změna frekvence a její vyrovnávání za pomoci primární regulace zdroje. Vzhledem k tomu, že se jedná o přechod do deficitního ostrova, tak dochází postupně k poklesu frekvence a je tedy nutné zvýšit výkon zdroje a frekvenčně odlehčovat zatížení, aby došlo k udržení jmenovité frekvence. Řízení probíhá podle statické charakteristiky sítě, která je tvořena součtem statické charakteristiky spotřeby a zdroje. V případě, že by se jednalo o úspěšnou regulaci, nedošlo by k rozpadu elektrizační soustavy a nevznikl by ostrovní provoz. Vzhledem k tomu, že deficit výkonů je příliš velký soustava není schopna za pomoci primární regulace uregulovat změnu výkonů a dochází k rozpadu elektrizační soustavy.
- V režimu regulace otáček – Dochází na jednotlivých zdrojích ke spuštění regulace za pomoci automatiky. Automatika má nastavené mezní frekvence pro vzrůst a pokles. Pokud se soustava bude nacházet mimo tyto toleranční meze, dojde ke spuštění regulace. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o primární regulaci, tak ve výsledku je vždy určitá odchylka díky tomu, že se změnil pouze sklon charakteristiky sítě, ale nedošlo k posunu charakteristiky. Sekundární regulace je pak schopna proporcionální odchylku frekvence po primární regulaci vyrovnat za pomoci podpůrných služeb.
- Regulace ostrova – V elektrické síti v ostrovním provozu jsou dva různé zdroje. Jedním je generátor poháněný parní turbínou a druhým je generátor poháněný vodní turbínou. V tomto případě je regulována vodní turbína otáčkovou regulací a parní turbína otáčkovou regulací s korekcí na záporné odchylky tlaku, nebo regulací průtoků páry, kde se rychleji dosáhne odstranění regulační odchylky.
- Najetí rezervního zdroje a fázování k síti pomocí automatiky – Při této situaci dochází k využití rezervního zdroje pro dosažení parametrů shodných s tvrdou sítí, zejména frekvence. Po synchronizaci se sítí dojde k připojení ostrova k elektrizační síti. Pro přiřazování jsou nutné časové průběhy napětí. Maximální hodnota napětí, frekvence a fázový posuv mezi ostrovem a sítí musí být stejný, respektive rozdíl musí být nulový.

Pro tento projekt je v MODES využívána testovací soustava CIGRE francouzsko-belgické přenosové soustavy. Tato soustava tvoří základ i pro ostatní projekty MODES pro testování krátkodobé, střednědobé i dlouhodobé dynamiky. Testovací soustava CIGRE je simulována a rozebrána v této práci. [12], [13]

LONG

Jak již název napovídá v tomto projektu je rozebrána problematika dlouhodobé dynamiky. Projekt poskytuje informace o dynamickém chování systémů s časovým rozsahem jednotek až desítek minut. Z technického hlediska se jedná o sekundární regulaci výkonu a frekvence. Z matematického hlediska jde o proporcionálně integrační článek, který vyhladí odchylku frekvence po primární regulaci. Sekundární regulace se týká pouze bloků v postižené části soustavy – princip neintervence. Soustava je rozdělena do 4 oblastí a v závislosti na tom, kde dojde k poklesu či vzrůstu výkonu nad dohodnutou předávanou hodnotu, tak v té oblasti dochází k regulaci výkonu. Výkon turbín se odvíjí od toho, jestli je daný deficit v oblasti na které se musí podílet, nebo má poskytnout pouze havarijní výpomoc postižené oblasti. [11], [12], [13]

Základním modelem je síť CIGRE při výpadku jednoho generátoru bez činnosti centrálního regulátoru P/f. Následně jsou jednotlivé projekty zaměřeny na analýzu při zapůsobení centrálního regulátoru P/f při výpadku generátoru, při změně zatížení, nebo napěťového kolapsu vyvolaného nárůstem zatížení. [11]

MIDDLE

MIDDLE je projektem, ve kterém se simuluje střednědobá dynamika. Je zde přímo uplatněna primární regulace, jelikož doba střednědobé dynamiky se pohybuje v řádu několika desítek sekund. Primární regulace je využívána vždy pokud dojde k vychýlení frekvence mimo dovolenou toleranci. Předcházíme tím rozpadu elektrizační soustavy. Regulace frekvence je zajišťována regulací výkonu turbíny. Frekvence je v elektrizační síti globální parametr a do primární regulace se tedy zapojují všechny bloky s primární regulací – princip solidarity. I tento projekt je simulován na testovací soustavě CIGRE. [11], [12], [13]

MOTOR

V tomto projektu jsou na elektrizační síti zobrazeny vlivy zkratu v návazných a nenávazných hladinách při příspěvku a bez příspěvku zkratového proudu motoru do místa zkratu. Je zde modelován i případ zaskoku napájení pro motory vlastní spotřeby. Jednotlivé situace jsou odděleny a detailně analyzovány pro každý případ zvlášť. Vzhledem k zaměření projektu se jedná o jednoduchou síť tvořenou tvrdou sítí, generátorem, transformátorem a motorickou zátěží. Ve své podstatě se jedná o zobrazení dodávky výkonu z elektrárny do sítě. Generátor má za úkol dodávat požadovaný výkon do sítě a zároveň napájet motorické spotřebiče vlastní spotřeby. Jedná se o vlastní spotřebu elektrárenského bloku, kde je nutné zajistit dodávku výkonu prvního stupně spolehlivosti. [12], [13]

WIND_TUR

Simulační projekt WIND_TUR je zaměřen na simulování poruch a přechodných jevů v sítích napájených větrnou farmou. V projektu je vytvořeno několik případů. Mezi hlavní případy patří zkrat na vedení, funkce asynchronního generátoru pracujícího do sítě NN poháněného větrnou turbínou a chování sítě při změnách parametrů větrné elektrárny. Jedná se o běžné vlivy, se kterými se musí u větrných elektráren počítat. [12]

NESYMETR

Nejrozsáhlejší projekt v programu MODES. Je zde nasimulována většina běžně se vyskytujících nesymetrických poruch na vedení. Mezi tyto poruchy patří jednofázové, dvoufázové a dvoufázové zemní zkrat, a dále například rozpojení jedné nebo dvou fází. Jednotlivé případy jsou ukázkami teoretických příkladů z učebnic s respektováním všech zjednodušení. Projekt je zaměřený zejména na ukázkou práce s nesymetrickými poruchami a schopnosti přiřadit do zkratové smyčky správnou hodnotu zkratové impedance. [12]

PHASEVAL

Rozšíření projektu NESYMETR je projekt PHASEVAL. PHASEVAL označuje práci s fázovými hodnoty. V tomto projektu jsou nasimulované případy nesymetrických poruch, kde jsou jednotlivé veličiny zobrazeny ve fázových hodnotách. Získáním informací o fázových hodnotách můžeme lépe vyhodnocovat poruchy a přiřazovat vhodný zásah ochrany. [12]

SHORT

Jedná se o projekt, kde je simulována přechodová stabilita synchronního stroje v případě zkratu. Zkrat je hlavní příčinou ztráty stability synchronního stroje a celý projekt je věnován simulacím zkratů a vlivu na generátor. Statická a dynamická stabilita je určujícím kritériem, zda porucha, která vznikla v síti nebo na svorkách generátoru je tak závažného charakteru, že dojde k výpadku stroje ze synchronismu. Závažnost poruchy souvisí s délkou trvání poruchy a vzdáleností od synchronního stroje. V jednotlivých případech jsou ukázky nejčastějších možných stavů. V případech je blíže ukázána spolupráce automatiky a ochrany pro vypnutí poruch. Celý projekt je sestaven na přenosové francouzsko-belgické testovací síti CIGRE. [11], [12], [13]

REG_STAB

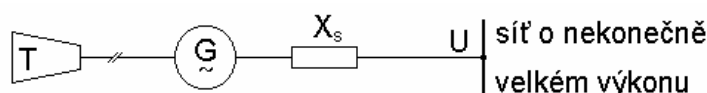
Projekt se zabývá především oblastí regulace a stabilizace poměrů v síti při specifikovaných změnách zatížení. V tomto projektu jsou simulovány trendové a skokové změny zatížení s funkcemi hladinových regulátorů, externích regulátorů a stabilizátorů. Jedná se např. o regulátor HRT (automatické přepínání odboček), dále specifické regulátory buzení generátorů. Stejně jako v předchozích projektech je i zde zásah v některých případech prováděn v testovací CIGRE síti. Jedná se především o případy regulace buzení generátoru při změně zatížení. V případech regulace pomocí hladinových regulátorů napětí je síť napájena jednodušším modelem sítě. Případy v této síti zobrazují spolupráci sekundární regulace jalového výkonu na základě informace stavu napětí na přípojnicích a regulace HRT na síťových transformátorech na základě přenášeného jalového výkonu po vedení. [12]

2 Modelování jednotlivých prvků elektrizační soustavy

Elektrizační soustavu lze považovat za systém skládající se z řady objektů. Celý systém si můžeme rozdělit na části týkající se výroby, přenosu a spotřeby. Pro pojetí modelování elektrizační soustavy můžeme část zabývající se výrobou modelovat pomocí bloků, síť pomocí větví a uzlů a na konci sítě zatížením požadovaného charakteru.

2.1 Synchronní generátor

Synchronní generátor je zařízení, které přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Zároveň tvoří poslední blok části výroby elektrické energie a je vstupním prvkem do přenosové soustavy. Generátor je ve smyslu řízení soustavy vstupním prvkem, jelikož je zdrojem elektrické energie. Může ovlivňovat činný i jalový výkon a pro ostrovní síť dokonce i frekvenci, jakožto hlavní síťový parametr. Pro modelování musíme generátor chápat jako blok poháněný turbínou s výkonem dodávajícím do elektrické sítě. Generátor při zanedbání činného odporu je respektován synchronní reaktancí X_s . [3], [6]



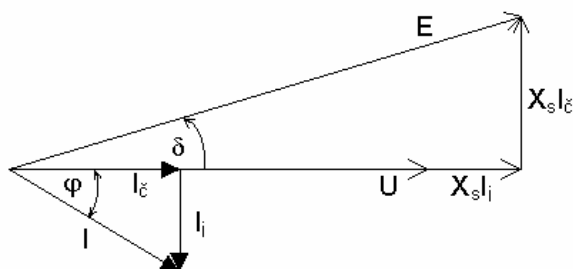
Obr 2.1 Schématické znázornění dodávky výkonu přes generátor [6]

Obrázek znázorňuje napájecí systém s ústředním členem generátorem, který je poháněn turbínou a připojen do tvrdé sítě. Vztahy popisující dodávku činného výkonu jsou odvozeny z vektorového diagramu.

$$\frac{X_s \cdot I_{\zeta}}{E} = \sin \delta \quad (2.1)$$

$$I_{\zeta} = \frac{E}{X_s} \cdot \sin \delta \quad (2.2)$$

$$P = U \cdot I_{\zeta} = \frac{U \cdot E}{X_s} \cdot \sin \delta \quad (2.3)$$



Obr 2.2 Vektorový diagram synchronního generátoru [6]

• **Synchronní generátor v MODES**

V programu MODES je vytvořen katalog všech komponent včetně generátorů. V základní nabídce je 11 různých typů generátorů. Při modelování není třeba se omezit pouze na těchto jedenáct předdefinovaných bloků, ale zásahem do jednotlivých parametrů můžeme vytvořit vlastní požadovaný generátor. [10]

Při implementování jednotlivých modelů synchronních strojů byly přijaty tyto předpoklady:

- Zanedbatelná odchylka otáček od synchronní hodnoty
- Neuvažují se transformační napětí (derivace statorových proudů podle času)
- Zanedbává se syčení stroje (reaktance nejsou funkcí času)
- Neuvažují se harmonické vyšších řádů pro elektromotorické síly statoru
- Rozložení vinutí rotoru je koncentrické
- Tlumící vinutí je 1 v podélné a 1 v příčné ose
- Tlumící vinutí jsou magneticky symetrická ($X_q = X_d$)
- Odpory a kapacity statorového vinutí jsou zanedbány
- Ztráty jsou hrazeny z mechanického výkonu

Rovnice synchronního stroje:

$$T'_d \cdot \frac{dE'_q}{dt} = U_B + (X_d - X'_d) \cdot I_d - E'_q \quad (2.4)$$

$$T'_q \cdot \frac{dE'_d}{dt} = -(X_q - X'_q) \cdot I_q - E'_d \quad (2.5)$$

$$T''_d \cdot \frac{dE''_q}{dt} = E'_q + (X'_d - X''_d) \cdot I_d - E''_q \quad (2.6)$$

$$T''_q \cdot \frac{dE''_d}{dt} = E'_d + (X'_q - X''_q) \cdot I_q - E''_d \quad (2.7)$$

Elektromotorická síla v příčné ose je rovna budicímu proudu podle následujícího vztahu:

$$E_q = I_B = E'_q - (X_d - X'_d) \cdot I_d \quad (2.8)$$

Mechanickou pohybovou rovnicí respektuje vztah:

$$T_M \cdot \frac{ds_G}{dt} = \frac{N_T}{(1 + s_G) \cdot k_N} - \frac{P_G + \Delta P_G}{1 + s_U} - M_{AS} \quad (2.9)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Omega_0 \cdot s_G \quad (2.10)$$

Asynchronní tlumicí moment stroje je dán vztahem:

$$M_{AS} = \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \frac{s \cdot T'_d}{1 + (s \cdot T'_d)^2} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \cdot \frac{s \cdot T''_d}{1 + (s \cdot T''_d)^2} + \left(\frac{1}{X'_q} - \frac{1}{X_q} \right) \cdot \frac{s \cdot T'_q}{1 + (s \cdot T'_q)^2} \quad (2.11)$$

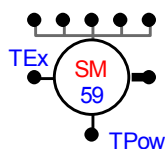
Mezi možnostmi volby generátoru v programu MODES patří:

- PARK – Parkův model generátoru je vhodný pro řešení krátkodobé dynamiky, kde je třeba respektovat buzení. Tento model respektuje kompletní sadu rovnic synchronního stroje.
- CLAS – Klasický model generátoru. Zanedbává přechodné děje v rotorovém obvodu a rázové složky elektromotorické síly jsou rovny konstantní hodnotě. Tento model řeší pouze pohybové rovnice a asynchronní tlumicí moment, proto je vhodný pro střednědobou dynamiku, kdy jsou poruchy elektricky vzdálené od místa vzniku.
- CONS – Konstantní model generátoru vznikne při zanedbání skluzu a zátěžného úhlu, přičemž respektujeme obě hodnoty jako konstantní. Tento model je vhodný k respektování přenosové soustavy, ve které neřešíme poruchy, pouze respektujeme výměnu výkonů mezi soustavami. Jedná se o zdroj nekonečného výkonu a frekvence je držena stále na konstantní hodnotě.
- DAMP – Odstraněním nedostatku modelu CONS získáváme model DAMP. Jedná se o model, který respektuje tlumení při kývání stroje. Další vlastností je, že udržuje nulovou střední hodnotu odchylky frekvence tak jako model CONS.
- EXTN – EXTN model respektuje odchylku systémové frekvence z řešení pohybové rovnice. Tento model je vhodný pro řešení dlouhodobé dynamiky.
- PMGC – Jedná se o model synchronního stroje s permanentními magnety a plno-výkonovým měničem. Model je vhodný pro např. větrnou turbínu, kde je třeba řešit regulaci přenášených výkonů. Měnič je tvořen IGBT tranzistory s pulzně šířkovou modulací a vektorovým řízením.

Pro oba simulační projekty, které jsou v této práci řešeny, je použit pro všechny synchronní stroje model PARK. [10]

• Synchronní generátor v EMTP-ATP

V programu EMTP-ATP je možno synchronní generátor respektovat pomocí tří modelů. Nejčastěji voleným modelem pro modelování generátoru je model SM59. Vzhledem k tomu, že požadované vstupní data jsou totožné se vstupními daty pro synchronní generátory v MODES, byl SM59 využit i pro simulační modely v této práci. Dalšími možnými bloky jsou Synchronous WI. Jedná se o blok velmi propracovaný s integrovanými základními modely buzení a řízení rychlosti. Pro simulaci nebyl vhodný vzhledem k velkému počtu vstupních údajů, které nebyly k dispozici. Využitím tohoto bloku by mohlo dojít k velkému zkreslení díky voleným vstupním veličinám. Třetí možností jak simulovat synchronní stroj je využití bloku UM Synchronous. Tento blok je nejméně vhodný z pohledu zadávání vstupních údajů jelikož vyžaduje zvlášť zadat odpor a indukčnost příčné i podélné osy a zvlášť zadat indukčnosti respektující magnetický obvod. [1], [2]

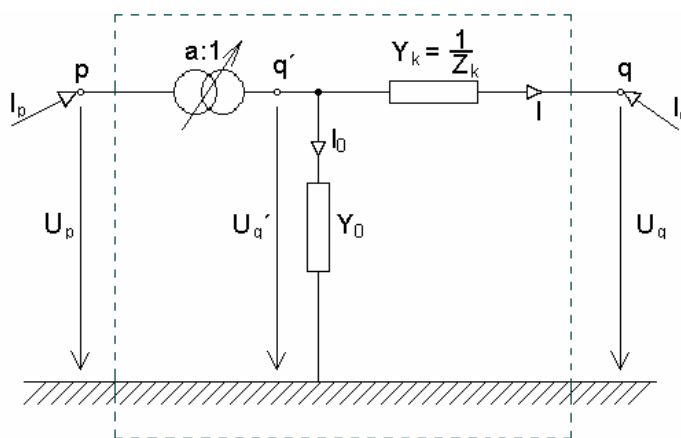


Obr 2.3 Generátor v EMTP-ATP model SM59

Model SM59 má primárně 3 přípojných body. TEx pro připojení budiče, TPow pro připojení turbíny a 3fázový vývod statorového vinutí pro připojení zátěže. Dále je možné přidat výstupy pro měření interních veličin a řídicích signálů (TACS). Blok SM59 nabízí sledovat až 20 různých interních elektrických i mechanických veličin. Maximální možný počet výstupů TACS je v jednom stroji 5. To může být do jisté míry nevýhodou, jelikož při využití některých výstupů pro řízení stroje nezůstává příliš prostoru pro měření dalších veličin. [2]

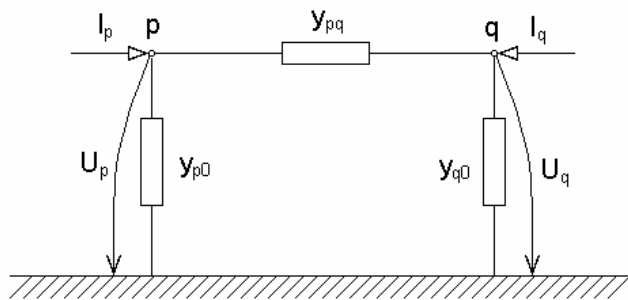
2.2 Transformátor

Transformátory se při modelování nahrazují nejčastěji T, Π , Γ článkem. Parametry náhradního článku lze určit z naměřených údajů naprázdno a nakrátko. Náhradní článek lze rozdělit na dvě části, které se skládají z příčné admitance a podélné impedance tvořící dle (Obr 2.4) např. gama článek. K těmto částem je potřeba přiřadit převodový poměr tvořený ideálním transformátorem v podélné větvi. [3], [6]



Obr 2.4 Schématické znázornění transformátoru pro modelování v síti Γ -článkem [6]

Na následujícím obrázku (Obr 2.5) je znázorněno schéma pro modelování transformátoru jako Π článek. V tomto případě je vliv převodu respektován v jednotlivých složkách admitancí, a to jak v podélné, tak v příčné větvi. Změna převodu má vliv na změnu admitancí. [6]



Obr 2.5 Schématické znázornění transformátoru pro modelování v síti Π -článkem [6]

Takto modelovaný transformátor s vlivem změny převodu ovlivňuje propustnost sítě, lze tedy vlivem úbytku napětí regulovat napětí v síti. V případě transformátoru bez regulace napětí, jsou admitance uzlů a větví neměnné a prvek lze brát jako statický blok s určitým úbytkem napětí. [6]

- **Transformátor v MODES**

V programu MODES lze transformátor modelovat pouze jako Π -článek. Zde jsou možnosti velmi omezené a v podstatě se jedná pouze o implementování převodu napětí do větve respektované činným odporem, indukčností a kapacitní susceptancí. Zadáním těchto parametrů mezi uzly vytvoříme příčnou a podélnou větev transformátoru. Vstupními údaji jsou pasivní prvky respektující štítkové údaje transformátoru dle následujících rovnic. [10]

$$Z_{Tn} = \frac{U_{Tn}^2}{S_{Tn}} \quad (2.12)$$

$$R_T = \frac{P_{Kn}}{S_{Tn}} \cdot Z_{Tn} \quad (2.13)$$

$$X_T = \sqrt{u_K \cdot p_{KON}^2 \cdot Z_{Tn}^2 - R_T^2} \quad (2.14)$$

Vzhledem k tomu, že v síti mohou vznikat i nesymetrické poruchy na které se vlivem převodu a typu spojení vinutí podílí i transformátor, umožňuje MODES zadat parametry nesymetrie.

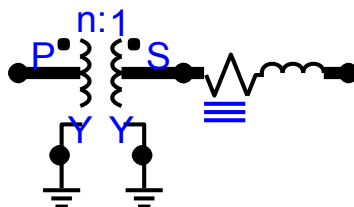
Pro případ ISLAND nejsou vloženy data pro modelování příčné admitance. Kapacitní susceptance není brána v úvahu a model bere v úvahu pouze příčnou větev složenou s RL prvky.

- **Transformátor v EMTP-ATP**

V prostředí EMTP-ATP jsou modely strojů obecně více propracované než je tomu v prostředí MODES. Transformátory lze volit ze 4 modelů dle složitosti. Nejjednodušším modelem transformátoru je blok Ideal. Blok respektuje pouze převod, jelikož se jedná o ideální transformátor. Nevýhodou bloku pomineme-li respektování úbytku napětí a výkonových ztrát, je především nemožnost změnit typ spojení vinutí. Základním nastavením pro blok Ideal je YNyn. Dalším blokem transformátorů je model Saturable. Tento blok respektuje saturaci transformátoru. Uvažuje se s odporem a indukčností primárního i sekundárního vinutí, případně terciárního a

s magnetizačním odporem a indukčností. Velmi vhodným doplněním je i možnost zadat magnetizační charakteristiku. Dalším blokem je BCTRAN. Výhodou tohoto bloku je, že zadáním štítkových údajů nám tento blok vytvoří relativně přesný model transformátoru. Výhodou je velké spektrum nastavení jednotlivých parametrů např. typ vinutí, typ jádra, magnetizační charakteristiku, souslednou i zpětnou složku pro simulace nesymetrií. Nejdokonalejším modelem transformátorů v EMTP-ATP je model Hybrid. V tomto modelu lze zadat detailněji i mezifázové a mezivinuťové kapacity a indukčnosti. I pro generování jádra transformátoru jsou v tomto modelu rozšířené možnosti, než v předchozích modelech transformátorů. [1], [2]

Vzhledem k dostupným parametrům, které jsou zadány v MODES, byl zvolen model ideálního transformátoru a pasivních RL prvků. Model ideálního transformátoru reprezentuje pouze převod a prvky R, L reprezentují parametry jádra a vinutí. V modelu sítě představují R, L prvky ztráty jalového a činného charakteru a zároveň úbytky napětí.



Obr 2.6 Model transformátoru v EMTP-ATP s RL prvky

Převod transformátorů byl určen ze znalosti velikosti napětí uzlů, mezi které je transformátor připojen a z poměrného převodu, který je v MODES zadán. Z MODES nelze jednoznačně určit ke které napět'ové straně transformátoru jsou pasivní prvky R, L připojeny, ale ze zpětné kontroly při přepočtu ztrát transformátoru je jednoznačné, že se jedná o sekundární proud. Pasivní prvky transformátoru jsou připojeny vždy na sekundární stranu.[10]

Činné ztráty transformátoru v ustáleném chodu:

$$\Delta P_T = 3 \cdot R_T \cdot I_2^2 \quad (2.15)$$

Výpočet proudu, pro určení ke které napět'ové straně jsou RL prvky napočítány:

$$I_2 = \sqrt{\frac{\Delta P_T}{3 \cdot R_T}} \quad (2.16)$$

Převod transformátoru:

$$p = \frac{U_1}{U_2} \quad (2.17)$$

Vztažné hodnoty napětí:

$$U_{V380} = 380 \text{ V} \quad (2.18)$$

$$U_{V150} = 150 \text{ V} \quad (2.19)$$

V MODES je převod určen jako poměrná hodnota. Poměrný převod transformátoru je:

$$p_p = \frac{\frac{U_1}{U_{V380}}}{\frac{U_2}{U_{V150}}} = \frac{U_1}{U_{V380}} \cdot \frac{U_{V150}}{U_2} = \frac{U_{V150}}{U_{V380}} \cdot p_T \quad (2.20)$$

Přepočet poměrného převodu transformátoru na absolutní převod:

$$p_T = \frac{U_{V380}}{U_{V150}} \cdot p_p \quad (2.21)$$

2.3 Vedení

Elektrické parametry venkovních a kabelových vedení je možné použít buď přímo k exaktnímu výpočtu přenosu elektrické energie, nebo obvykle k realizaci náhradního schéma se soustředěnými parametry s různými stupni dalšího zjednodušování. Elementy soustavy si jsou potom jednotlivé náhradní články. Za předpokladu symetrické soustavy se v simulačních programech používají náhradní články. V podélné části je modelován odpor a induktivní reaktance vedení a v příčné větvi kapacita a svod. [3]

Ve vedeních způsobuje přenos jalového výkonu činné ztráty. Snížením přenosu jalového výkonu snížíme úbytek napětí a ztráty v přenosu a rozvodu při přenášení stále stejného činného výkonu. [6]

Pro činné ztráty platí vztah:

$$\Delta P = 3 \cdot R_V \cdot I^2 = R_V \cdot \left(\frac{P^2}{U^2} + \frac{Q^2}{U^2} \right) \quad (2.22)$$

Přenos jalového výkonu vyvolá činné ztráty:

$$\Delta P_Q = \frac{R_V \cdot Q^2}{U^2} \quad (2.23)$$

Pokud zajistíme přenos minimálního, ideálně žádného jalového výkonu snížíme ztráty vyvolané přenosem na minimum. Předávka výkonu bude nejpříznivější, při zatížení vedení vlnovou impedancí. Zatížení vedení vlnovou impedancí dosáhneme přenosu přirozeného výkonu po vedení. Přenos výkonu pod přirozeným výkonem je charakterizován kapacitní charakterem. Znamená to, že vedení je odlehčené a na konci vedení se může objevit vyšší napětí než na začátku díky Ferrantiho jevu. Vedení se stává zdrojem jalového výkonu. Naopak při přenosu výkonu nad přirozeným výkonem je vedení spotřebičem jalového výkonu, má tedy induktivní charakter. Přirozený výkon je závislostí indukčnosti a kapacity vedení.

$$S_p = \frac{U_2^2}{Z_V} \quad (2.24)$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{Z_K}{Y_K}} = \sqrt{\frac{R_K + j\omega L_K}{G_K + j\omega C_K}} = \sqrt{\frac{L_K \left(\frac{R_K}{L_K} + j\omega\right)}{C_K \left(\frac{G_K}{C_K} + j\omega\right)}} = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}} \quad (2.25)$$

Z hlediska modelování vedení mají významný vliv zejména odpor a indukčnost vedení. Na vyšších napěťových hladinách i kapacita vedení a svod.

Indukčnost vedení je obecně potřeba rozdělit na vzájemnou a vlastní. Pro úvahu vzájemných závislostí parametrů vedení postačí následující vztah. Pro indukčnost vedení platí. [5]

$$L_C = L - M = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{l}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{a}{r} + 0,05\right) \quad (2.26)$$

Indukčnost je přímo závislá na rozložení vodičů mezi sebou a nepřímo závislá na poloměru vedení. Čím bude indukčnost větší, tím bude indukční reaktance větší a tím větší budou i úbytky napětí. Vzdálenost vodičů je do určité míry dána přeskokovou hodnotou napětí a příliš ji ovlivňovat nemůžeme. Z hlediska snížení indukčnosti vedení je vhodný použít svazkový vodič, který zvýší ekvivalentní poloměr vodiče a tím sníží indukčnost. [5]

Pro kapacitu vedení tedy platí následující vztah.

$$C_V = \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{d_S}{r} \frac{2m}{D_S}} \quad (2.27)$$

Zjednodušeně platí, že hodnota kapacity závisí na poloměru vodiče, výšce vedení nad zemí a vzájemné rozložení vodičů mezi sebou. Zvýšením kapacity lze kompenzovat indukčnost. Volbou svazkového vodiče dojde ke zvýšení hodnoty ekvivalentního poloměru a tím ke zvýšení kapacity. Rozložení vodičů mezi sebou je v opačné úměrnosti než u indukčnosti.

Odpor vedení je závislý na průřezu, materiálu a délce vodiče. Změnou nejčastěji průřezu ovlivňujeme propustnost vedení. Volbou vyšší napěťové hladiny se sníží přenášený proud a poklesnou výkonové ztráty na vedení. [5]

$$R_V = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.28)$$

Svodová vodivost vedení způsobuje činné ztráty. Je dána především kvalitou izolátorů. Závisí na kvadrátu napětí a na svodové hodnotě izolátorů. [5]

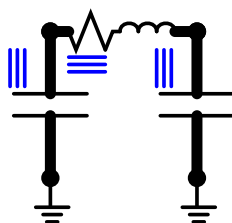
$$\Delta P_S = 3 \cdot U_f^2 \cdot G_S \quad (2.29)$$

- **Vedení v MODES**

Vedení v MODES je koncipováno podobně jako transformátor v MODES. V podstatě se jedná o vodivé spojení mezi dvěma uzly. V případě transformátoru je větev zadána s převodem a v případě vedení je větev respektována pouze RLC prvky. Typ náhradního článku zůstává stejný jako u transformátoru, jedná se vždy o Π -článek. Pro případy nesymetrie lze zadat zpětnou a netočivou složku parametrů vedení. [10]

- **Vedení v EMTP-ATP**

Podobně jako u transformátoru i zde jsou oproti MODES širší možnosti simulování vedení. Mezi základní rozdělení patří simulování kabelového a venkovního vedení. Pro tyto možnosti je v programu EMTP-ATP implementována procedura LCC. Dalším základním rozdělením je možnost simulovat rozložené či soustředěné parametry vedení. Soustředěné parametry mohou být typu RLC jako Π -článek 1,2,3 fázové nebo RL jako Π -článek 1,2,3,6 fázové. V rozložených parametrech jsou možnosti volby transponovaného (Clarkova) modelu, nebo netransponovaného (KCLee) modelu. Pro verifikaci modelu by mohl přesnější model vedení zanášet odchylku, proto byl zvolen model respektovaný RLC prvky v Π -člátku. [2]



Obr 2.7 Model vedení v EMTP-ATP (Π -článek)

2.4 Zátěž

Modely zátěží zahrnují velké charakteristické zátěže. Skládají se z velkého množství menších zátěží měnících svoje hodnoty a složení. Na základě těchto faktorů je třeba určit potřebný model zátěže. Obecná zatěžovací charakteristika vznikne tak, že zdánlivý výkon na přípojnici je funkcí napětí a frekvence. [3]

$$P = k_p \cdot U \cdot f \quad (2.30)$$

$$Q = k_q \cdot U \cdot f \quad (2.31)$$

- **Zátěž v MODES**

Model zátěží v MODES je zadán jako odběr v uzlu. Respektovaný odběr v uzlu může být různého charakteru. V MODES jsou 4 typy předdefinovaných modelů zátěže. [9], [10]

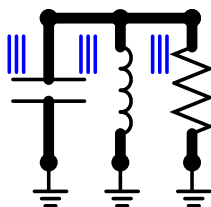
- Termostatická zátěž - Tento typ zátěže se zadává pouze pro činný charakter odběru. Sestává se s časově proměnné části zátěže, která se mění se změnou oteplení.
- Statická zátěž – Tento model je vhodný pro použití v síti, kde dochází k malým změnám U a f . Statická zátěž je nejčastěji používaným typem zátěže při testování ISLAND.
- Dynamická zátěž – Je závislá na změnách napětí a frekvence v celém rozsahu a důsledkem jsou dynamické závislosti odběru.
- Zátěž typu ekvivalentního asynchronního motoru – Zátěž je tvořena stacionárním modelem motoru, kdy je zanedbán elektromagnetický přechodný děj v obvodu statoru a rotoru. Model je tvořen prvky náhradního schématu a mechanickou časovou konstantou. Zatěžovací moment je zadán konstantním parametrem. [9]

V projektu DIESEL není specifikován určitý typ zátěže, je zde pouze nastavený odebíraný činný a jalový výkon. Projekt je koncipován na testování diesel-generátoru a zátěž je v tomto případě sekundárním článkem sítě, tak není nutné ji více specifikovat. Zátěž je tedy tvořena konstantní admitancí, což odpovídá při činném odběru konduktanci a při jalovém odběru susceptanci. V projektu ISLAND je již charakter zátěže různě kombinován. Vzhledem k tomu, že projekt ISLAND je v MODES testován z hlediska dynamického chování, mají zátěže významný vliv na chování celé soustavy.

• Zátěž v EMTP-ATP

Zátěže mohou být složeny z obvodových lineárních či nelineárních RLC prvků, nebo točivých strojů. Z pohledů různých kombinací jsou možnosti v EMTP-ATP více otevřenější, než v prostředí MODES. Ve verifikovaných projektech je využito pouze lineárních RLC prvků a v případě motorové zátěže je využit model asynchronního motoru, který je zvlášť popsán v následující kapitole (2.5).

V síti ISLAND jsou z pohledu ustáleného stavu pouze pasivní zátěže. V odběrových uzlech jsou tvořeny odporem a indukčností. V síti se nachází i kompenzační uzly. Zde je jako kompenzační prvek použit kondenzátor. Činný a jalový odběr byl spočítán z velikosti napětí v jednotlivých uzlech. V projektu DIESEL je zátěž tvořena definovaným odběrem v uzlu, stejně jako v projektu ISLAND. V EMTP-ATP lze modelovat zátěž pouze jako napěťově závislou, proto nelze pro výpočet pasivních prvků použít hodnotu vztažného napětí, ale přímo hodnotu při které bude tento výkon odebírán. Pro kompenzační prvky je napěťová závislost nutná, jsou tedy napočítány ze vztažných hodnot napětí. [2], [9]



Obr 2.8 Model zátěže včetně kompenzace v EMTP-ATP

Pro každý odběrný i kompenzační uzel v projektu ISLAND byl proveden výpočet dle následujících vztahů. Vypočítané hodnoty pro jednu fázi:

Odpor respektující činný odběr:

$$R_Z = \frac{\left(\frac{U_Z}{\sqrt{3}}\right)^2}{P/3} \quad (2.32)$$

Indukční reaktance respektující jalový odběr:

$$X_Z = \frac{\left(\frac{U_Z}{\sqrt{3}}\right)^2}{Q/3} \quad (2.33)$$

Susceptance respektující kompenzační výkon:

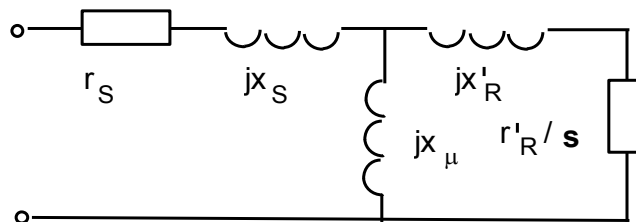
$$B_C = \frac{Q/3}{2\pi f \left(\frac{U_{V70}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (2.34)$$

Pro projekt DIESEL je výpočet totožný, pouze není připojen kompenzační prvek. Zátěž tvoří pouze indukční reaktance dle vztahu (2.33) a odpor dle vztahu (2.32)

2.5 Motor

Simulace motoru a celkově všech strojů patří mezi nejsložitější partie modelu. Pro přesný simulační model je třeba vycházet z naměřených charakteristiky simulovaného stroje a katalogových údajů výrobce.

Modelování motoru jako zátěže je v EMTP-ATP značně obtížnější, než v síťových simulátorech typu MODES. Obtížnost je dána zejména potřebou znát velké množství údajů pro vytvoření přesného modelu. Dalším překážkou a zároveň nepřesností může být analogie mezi elektrickými a mechanickými veličinami. Vzhledem k tomu, že motory patří k nejvíce zastoupeným spotřebičům v síti, je třeba v simulačních schématech vytvořit adekvátní model. Pro simulaci motoru obecně vycházíme z náhradního schématu. V náhradním schématu jsou dvě konstrukční části stroje zobrazeny jako jedno elektrické schéma. [7]



Obr 2.9 Náhradní schéma AM [7]

• Motory v MODES

V MODES jsou motory zadávány tak, že respektují především elektromechanické děje. Rozšířenou možností je zadávat parametry tlumení a sycení. Elektromechanické děje jsou reprezentovány především mechanickým pohybem rotorů. Při řešení elektromechanických přechodných dějů se vychází z mechanických setrvačných vlastností elektrických točivých strojů, které jsou spojeny s jejich rotory a z elektrických vazeb mezi všemi články ES. Zadávané parametry v MODES jsou následující. [4], [9], [10]

Parametry pro 2 klecový typ motoru:

Tab 2-1 Parametry asynchronního stroje v MODES pro speciální motor

| S_N (MVA) | K_{ZAT} (-) | $\cos\varphi \cdot \eta$ (-) | n_n (1/min) | T_m (s) | R_1 (-) | X_1 (-) | R_2 (-) | X_2 (-) | X_μ (-) | R_3 (-) | X_3 (-) |
|----------------|------------------|---------------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| 1,21 | 0,96 | 0,8 | 990 | 0,7 | 0,001 | 0,12 | 0,01 | 0,11 | 2,5 | 0,1 | 0,03 |

• Motory v EMTP-ATP

Motor je tvořen prvkem UM3, který respektuje indukční motor s kotvou na krátko. Pro tento model je třeba vycházet z prvků náhradního schématu. Pro výpočet prvků a přepočet do d, q souřadnic včetně magnetického obvodu, byl použit pomocný softwarový nástroj motdatpr.exe, který vygeneroval parametry na základě vstupních údajů uvedených v (Tab 2-2). Byl zvolen typ pouze s 1 klecí, jelikož motdatpr.exe nemá možnosti pro nastavení speciálních typů motorů. Pro aproximační přiblížení k motoru se speciální klecí, byl volen přístup metody pokus-omyl, pomocí níž došlo k přiblížení momentové charakteristiky motoru. Nutnost vytvořit model motoru se speciální klecí je vyžadován především z hlediska rozbíhání motoru se zatížením, kdy v případě motoru s jednoduchou klecí při definovaném zatížení z MODES nedojde k rozběhu. Pro přesnější model jsou vyžadovány detailnější informace, podle kterého by se daný motor mohl definovat. [2]

Otáčky:

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{3} = 1000 \text{ ot/min} \quad (2.35)$$

Skluz:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1000 - 990}{1000} = 0,01 \quad (2.36)$$

Úhlová rychlost:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{\pi \cdot 990}{30} = 103,67 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.37)$$

Činný výkon motoru:

$$P_N = S_N \cdot \cos\varphi_N = 1,21 \cdot 0,8 = 968 \text{ kW} \quad (2.38)$$

Proud:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{968 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 0,8} = 111 \text{ A} \quad (2.39)$$

Moment:

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{968 \cdot 10^3}{103,67} = 9337 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.40)$$

Moment zatížení:

$$M_{ZAT} = M_N \cdot K_{ZAT} = 9337 \cdot 0,96 = 8964 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.41)$$

Kromě elektrických parametrů je třeba pro komplexní stránku modelu respektovat i mechanické parametry, které přímo ovlivňují elektrické veličiny. Pro správnou znalost doby trvání rozběhu je třeba respektovat moment setrvačnosti. Ten lze přímo určit ze znalosti mechanické časové konstanty, ze jmenovitého zdánlivého výkonu a ze jmenovité úhlové rychlosti.

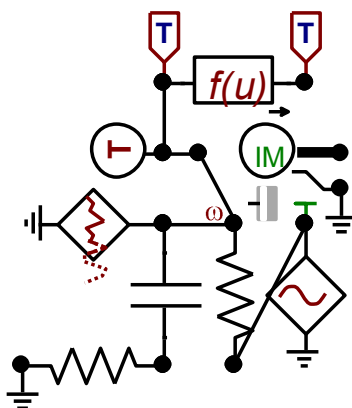
Moment setrvačnosti:

$$J_N = \frac{T_m \cdot S_N}{\omega_n^2} = \frac{0,7 \cdot 1,21 \cdot 10^6}{103,67^2} = 78,81 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.42)$$

Tab 2-2 Parametry vstupních hodnot asynchronního motoru pro generování prvků L , R

| | |
|---------------------|------|
| U_N (kV) | 6,3 |
| P_N (kW) | 968 |
| s_n (-) | 0,01 |
| η_n (-) | 0,98 |
| $\cos\varphi_N$ (-) | 0,82 |
| i_Z (-) | 5 |

V Tab 3-4 jsou vygenerované hodnoty, které lze přímo zadat do modelu UM3.



Obr 2.10 Asynchronní motor s doplňujícími prvky

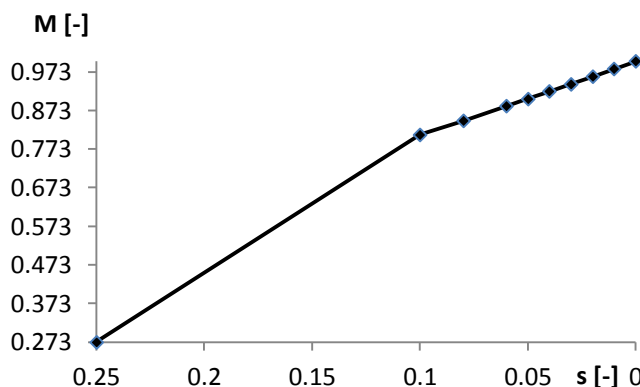
Kondenzátor respektuje moment setrvačnosti motoru a odpor tvoří tlumič mechanických kmitů. Proudový zdroj střídavého proudu je připojen pouze pro inicializaci motoru, aby došlo k rozběhu. Stejnsměrný empirický proudový zdroj má hodnotu momentu poháněného zařízení asynchronního motoru. Zbývající prvky jsou v obvodu zapojeny jen pro vyhodnocení otáček a skluzu motoru, nejsou pro funkci motoru důležité. [1], [2]

Tab 2-3 Parametry prvků respektující mechanické vlastnosti stroje [2]

| Prvek v obvodu | Elektrické veličiny | | Mechanické veličiny | |
|---------------------|-----------------------|----------|------------------------------------|----------|
| Kondenzátor | C (μF) | 78810000 | J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) | 78810000 |
| Tlumicí odpor | R (Ω) | 0,005 | | |
| Empirický I zdroj | I (A) | 0 - 8964 | M ($\text{N}\cdot\text{m}$) | 0 - 8964 |
| STR I zdroj | I (A) | 0,001 | | |

Poháněné zařízení

K asynchronnímu motoru je připojeno poháněné zařízení, které je definováno momentovou charakteristikou. Charakteristika je naznačena na následujícím obrázku (Obr 2.11). Mezi jednotlivými body momentové charakteristiky je provedena lineární interpolace.



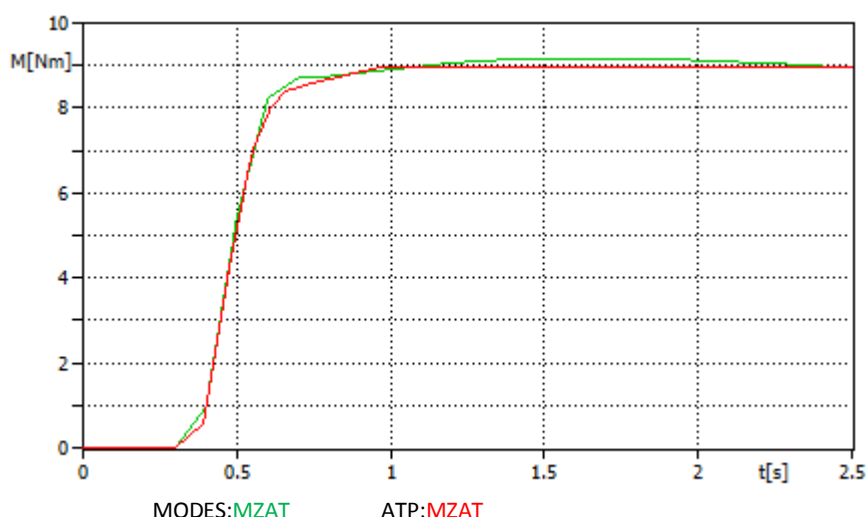
Obr 2.11 Ilustrační graf zatěžovacího momentu poháněného zařízení

Tab 2-4 Parametry momentové charakteristiky z MODES

| Skluz | $s_1 (-)$ | $s_2 (-)$ | $s_3 (-)$ | $s_4 (-)$ | $s_5 (-)$ | $s_6 (-)$ | $s_7 (-)$ | $s_8 (-)$ | $s_9 (-)$ | $s_{10} (-)$ |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,1 | 0,25 |
| Moment | $M_1 (-)$ | $M_2 (-)$ | $M_3 (-)$ | $M_4 (-)$ | $M_5 (-)$ | $M_6 (-)$ | $M_7 (-)$ | $M_8 (-)$ | $M_9 (-)$ | $M_{10} (-)$ |
| Zátěže | 1 | 0,98 | 0,96 | 0,941 | 0,922 | 0,903 | 0,884 | 0,846 | 0,81 | 0,273 |

Tab 2-5 Parametry proudového SS zdroje respektující poháněné zařízení v EMTP-ATP

| Čas | $t_1 (s)$ | $t_2 (s)$ | $t_3 (s)$ | $t_4 (s)$ | $t_5 (s)$ | $t_6 (s)$ | $t_7 (s)$ | $t_8 (s)$ | $t_9 (s)$ | $t_{10} (s)$ | $t_{11} (s)$ | $t_{12} (s)$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| | 0,39 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 |
| I_{ZAT} | $I_1 (A)$ | $I_2 (A)$ | $I_3 (A)$ | $I_4 (A)$ | $I_5 (A)$ | $I_6 (A)$ | $I_7 (A)$ | $I_8 (A)$ | $I_9 (A)$ | $I_{10} (A)$ | $I_{11} (A)$ | $I_{12} (A)$ |
| | -536 | -920 | -3242 | -5204 | -6986 | -7890 | -8372 | -8357 | -8304 | -8392 | -8437 | -8871 |

**Obr 2.12** Průběh zatěžovacího momentu poháněného zařízení

Jednotlivé zatěžovací momenty v závislosti na skluzu byly v EMTP-ATP zadávány v závislosti na čase. Vzhledem k tomu, že momentová charakteristika motoru v EMTP-ATP (červená) je relativně přesná s momentovou charakteristikou z MODES (zelená), zanáší poháněné zařízení minimální chybu. Je třeba ale zohlednit, že vzhledem k nesteržné momentové charakteristice motoru viz (Obr 3.10) je vlivem přepínání momentového zatížení na čase ne na skluzu zanesena určitá nepřesnost.

2.6 Budič

Pro řízení generátoru polem, je v elektroenergetice využíváno zařízení pro buzení a regulaci buzení. Při vytváření přesnějších modelů a pro větší rozsah řízení jsou tyto prvky nezbytné v modelování výrobních bloků. V následující kapitole budou popsány budiče a regulační systémy buzení nejčastěji využívané pro řízení generátorů.

Pomocí buzení můžeme regulovat tok jalového výkonu díky regulaci napětí na svorkách generátoru. V podstatě přímo řídíme účinník generátoru.

V obecném pojetí existují 3 základní typy budičů:

- stejnosměrný budič
- střídavý budič
- tyristorové buzení nezávislé a závislé

[10]

• Budiče v MODES

V programu MODES je využíváno 7 různých budících systémů. Modely budičů jsou navrženy dle metodika IEEE s tím rozdílem, že modely regulátoru a vlastního budiče jsou odděleny (struktura modelu regulátoru IEEE totiž neodpovídá evropským podmínkám, neboť uvažuje pouze proporcionální regulátor). V následujícím odstavci budou popsány jen dva zjednodušené a jeden konkrétní budící systém, který je využit v modelu DIESEL. [10]

Systém buzení se skládá z regulace buzení a budiče, přičemž výstup regulátoru buzení R_B je současně vstupní veličinou pro budič a přímo ovládá akční člen buzení

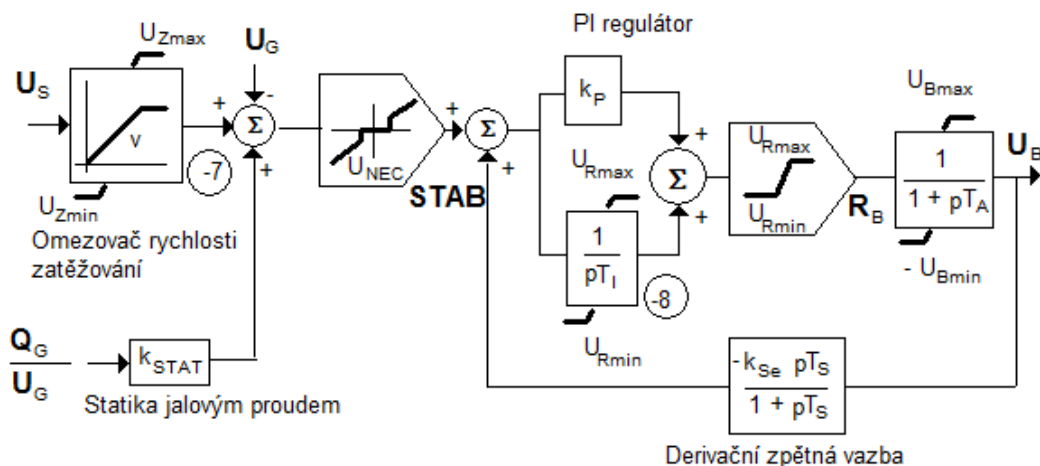
1. CONS

Jedná se o zjednodušený systém buzení. Budič trvale budí konstantní hodnotou U_B . Jde o stejnosměrný systém buzení bez regulátoru.

$$U_B = \text{konst.} \quad (2.43)$$

2. STAN

Stejně jako předchozí systém i tento systém je zjednodušeným systémem buzení. Jedná se o standardní systém buzení s budičem a primárním regulátorem napětí.



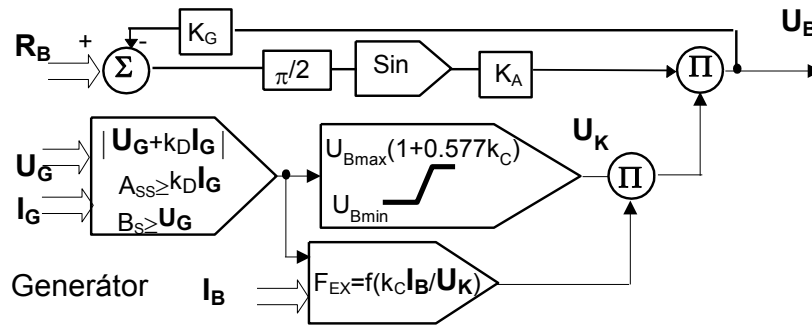
Obr 2.13 Zjednodušené systémy Buzení STAN a CONS – čerpáno z MODES

3. ST_3

Model budiče ST_3 je využit v systému buzení v projektu DIESEL. Jedná se o budič s kompaundovaným buzením. V tomto budiči dochází ke kompaundaci napětí a proudu generátoru s budícím proudem. Závislé kompaundované tyristorové buzení tvoří řízený tyristorový usměrňovač napájený z hlavního synchronního generátoru. Na následujícím obrázku je situačně naznačeno blokové schéma budiče. [10]

Tab 2-6 Parametry budiče ST_3 [17]

| k_g | U_{bmin} | U_{bmax} | K_a | K_c | K_d | A_{ss} | B_s |
|-------|------------|------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 0,1 | -5 | 4,2 | 8,89 | 0,016 | 0,251 | 0,78 | 1,1 |



Obr 2.14 Model budiče ST_3 v MODES [10]

Napájecí napětí U_K se získá vektorovým součtem fázorů napětí a proudu generátoru násobeného parametrem k_D . Sycení transformátorů se respektuje parametry B_s a A_{ss} . Volbou nenulového parametru k_G se zavádí zpětná vazba mezi napětím budiče a řídicím napětím regulátoru. Model budiče je tvořen matematickou funkcí sinus a zesilovacími členy, kde první z nich nám dává informaci o otevření můstku $\pi/2$ (plně otevřený můstek) a druhý k_a zesiluje přenášený signál.

Horní omezení napájecího napětí U_K dané součinem $U_{Bmax} (1 + k_c)$, protože hodnota U_{Bmax} se získává měřením na zatíženém můstku.

pro $U_K < 0,433$ platí:

$$Fex = 1 - 0,577 \cdot U_K \quad (2.44)$$

pro U_K : $0,433 < U_K < 0,75$ platí:

$$Fex = \sqrt{0,75 - U_K^2} \quad (2.45)$$

pro U_K : $0,75 < U_K < 1$ platí:

$$Fex = 1,732 \cdot (1 - U_k) \quad (2.46)$$

V simulovaných přechodných dějích parametr U_k nepřekročí hodnotu 0,433, proto je v modelu budiče pouze respektována nelinearita pouze podle vztahu (2.44). Funkce Fex je závislá od počtu komutujících diod v můstku.[16]

Přenos mezi regulátorem a budičem je lineární. Modelované uspořádání kompenzuje:

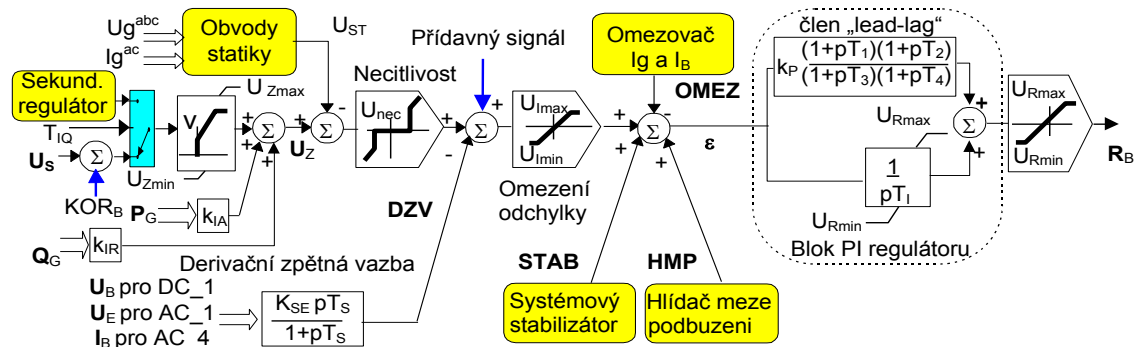
- Nelinearitu přenosu řízeného usměrňovače
- Úbytky napětí
- Změny napájecího napětí

[10]

• Regulace buzení v MODES

Účelem regulace buzení je udržet zadané napětí na svorkách generátoru. Tento požadavek patří do primární regulace. Pro udržení napětí obvykle regulátor požaduje kompaundaci jalového proudu, která zaručí statiku primární regulace (působí na sklon regulační charakteristiky). Lze konstatovat, že napětí je funkcí jalového výkonu.

Kromě zmíněného účelu může mít regulátor i doplňkovou funkci. Nejčastěji se využívají funkce omezovače statorového a rotorového proudu, hlídač meze podbuzení, systémový stabilizátor, nebo sekundární regulátor jalového výkonu. Vzhledem k tomu, že je pouze jedna z doplňkových funkcí v regulátoru buzení pro DIESEL využívána, bude jen tato funkce rozebrána. [10]



Obr 2.15 Schéma regulátoru buzení – čerpáno z MODES

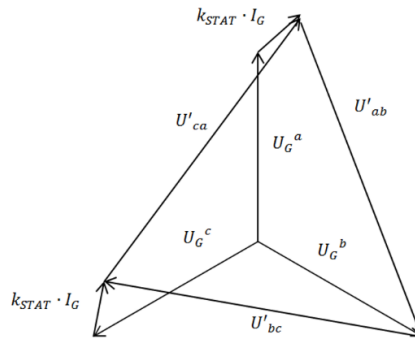
Tab 2-7 Parametry regulátoru buzení [17]

| $U_{zmin} (-)$ | $U_{zmax} (-)$ | $U_{nec} (-)$ | $K_{stat} (-)$ | $K_p (-)$ | $K_{se} (-)$ | $T_I (s)$ | $T_s (s)$ | $T_1 (s)$ | $T_3 (s)$ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|
| 0,9 | 1,1 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 1 | 0,2 | 0,8 |
| $v(‰/s)$ | $U_{Rmax} (-)$ | $U_{Rmin} (-)$ | $U_{Imin} (-)$ | $U_{Imax} (-)$ | $T_2 (s)$ | $T_4 (s)$ | $K_{IA} (-)$ | $K_{IR} (-)$ | |
| 10 | 1 | -1 | -0,34 | 0,34 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Výstupem regulátoru buzení je regulační odchylka ε . Odchylka je vytvořena rozdílem žádané a aktuální hodnoty. Žádaná hodnota může být výstupem sekundárního regulátoru případně hodnotou

statorového napětí generátoru korigované výstupem externího regulátoru KOR_B . Následně je hodnota omezována omezovačem rychlosti zatížení. Omezovač zajistí rychlost změny a hodnotu veličiny na zpracovatelnou úroveň pro další obvody. Dalšími vstupy do regulace buzení může být kompaundace činným či jalovým proudem. V projektu DIESEL není kompaundace činným ani jalovým proudem využívána. Do regulace buzení vstupuje signál o zajištění statiky generátoru, která se odečítá od žádané hodnoty. Statika je dána velikostí napětí a jalového proudu ve fázích. V případě že dochází k nesymetrii v síti, je hodnota statiky působící do regulace dána vztahem:

$$U_{ST} = \frac{U'_{ab} + U'_{bc} + U'_{ca}}{3} \quad (2.47)$$



Obr 2.16 Vektorový diagram stabilizátoru napětí pro regulaci buzení [10]

V případě symetrie v síti:

$$U_{ST} = U_G - k_{STAT} \cdot \frac{Q_G}{U_G} \quad (2.48)$$

V případě projektu DIESEL je $k_{STAT} = 0$, proto:

$$U_{ST} = U_G \quad (2.49)$$

Pásmo necitlivosti ani derivační zpětná vazba není v regulaci buzení DIESEL využíváno. Pro zajištění zpracovatelné úrovně signálu je opět využito prvku pro omezení odchylky. Posledním členem v regulaci buzení je člen “lead-lag“. Jedná se o proporciální část regulátoru, který je pro model DIESEL využit ke zlepšení dynamických vlastností proporciálních regulátorů. [10]

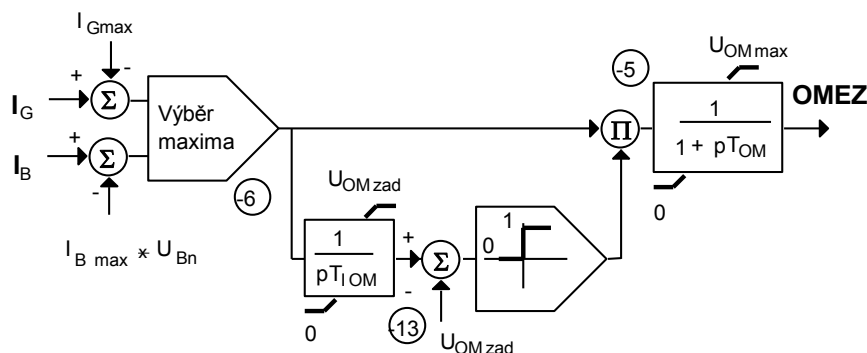
- **Omezovač proudů v MODES**

Omezovač proudů zastupuje v regulaci buzení důležitou ochranou funkci proti přetížení generátoru. Vstupem jsou hodnoty statorového proudu a buzení. Pro obě hodnoty jsou nastavena mezní hodnoty proudu, které se odečítají od vstupu. Následně dochází k výběru maxima z obou proudů. Jedná se o komparaci vstupních proudů a pro další zpracování je vybrán větší z nich. Další blokem pro zpracování je integrační člen s omezením, kde při integrování hodnoty omezení dojde k přepnutí výstupu do logické jedničky a zpracování v dalším integračním bloku. První integrační

blok slouží k zohlednění časové závislosti povoleného přetížení a druhý integrační blok slouží k zabránění prudkých změn napětí v regulátoru. [10]

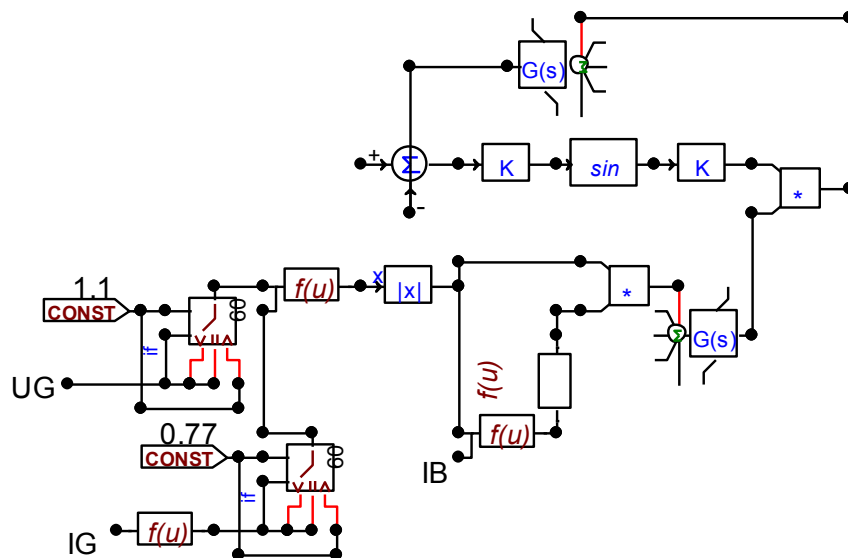
Tab 2-8 Parametry omezovače proudu [17]

| U_{OMmax} (-) | U_{OMzad} (-) | T_{iOM} (s) | T_{OM} (s) | I_{Bmax} (-) | I_{Gmax} (-) |
|-----------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|----------------|
| 0,3 | 40 | 1 | 0,3 | 1,05 | 1,05 |



Obr 2.17 Schéma omezovače proudů– čerpáno z MODES

- Budič v EMTP-ATP**

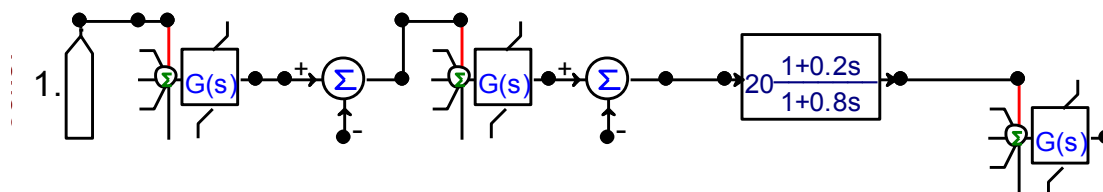


Obr 2.18 Schéma budiče v EMTP-ATP

V EMTP-ATP je budič poskládán z matematicko-logických bloků procedury TACS. Spojení jednotlivých bloků odpovídá koncepci budiče ST_3. V horní části je vstup pro signál regulátoru buzení, který následně prochází přes otevřený můstek na usměrňovač. Usměrňovač je simulován sinusovou přenosovou funkcí. Výstup je zesílen konstantou K_a a vynásobený se signálem z kompaundační části budiče. Výstupem je budící napětí, které vstupuje do generátoru. [4]

- **Regulátor buzení v EMTP-ATP**

Regulace buzení v EMTP-ATP respektuje pouze aktivní prvky pro projekt DIESEL. Model tedy neobsahuje prvky, které nebyly do regulace zapojeny. Výsledný model regulátoru je na Obr 2.19.

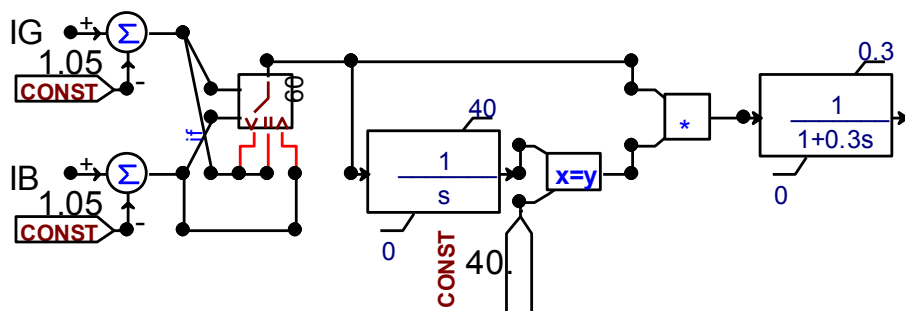


Obr 2.19 Schéma regulátoru buzení v EMTP-ATP

Na vstup je možno přivádět signál ze sekundární regulace napětí, proto jsem tuto možnost, ačkoliv není v MODES využívána, nechal zpřístupněnou. Pokud není připojena informace ze sekundární regulace, je možno zadat hodnotu napětí, na kterou se má regulovat. Následuje blok omezovače signálu, který je nastaven kvůli sekundární regulaci, nebo dalším vstupům pro řízení napětí. Výstup z omezovače je následně odečítán od aktuální hodnoty napětí na generátoru. Signál je dále přes omezovač přiváděn na rozdílový člen, kde je hodnota odečtena od signálu omezovače proudu. Posledním členem regulace je proporciální integračně derivační článek. Respektuje dynamické chování regulátoru. Před vstupem do budiče je signál opět omezen omezovačem, aby se zajistilo, že regulační signál po všech úpravách bude ve zpracovatelné úrovni. [10]

- **Omezovač proudů v EMTP-ATP**

Omezovač proudů pro regulátor napětí byl vytvořen dle popisu omezovače v MODES. Informace o velikosti proudu generátoru a budícího proudu je přivedena na rozdílový článek, kde je porovnávána s proudovým omezením nastaveným na 105% jmenovité hodnoty. Následně je vybrán ten proud, který překročí hodnotu, nebo ten větší z nich. Pro omezení proudů je v omezovači nastaveno zpoždění pomocí integrátoru. Při na integrování integrátoru na nastavenou hodnotu dojde k nastavení výstupu na logickou 1. Součinný člen spustí druhý integrátor s omezením výstupní hodnoty na 0,3. Objasnění funkce obou typů integrátorů je v popisu omezovače proudů v MODES viz výše. [10]



Obr 2.20 Omezovač proudů v EMTP-ATP

2.7 Spalovací motor

Model spalovacího diesel motoru není v simulačním modelu modelován. Zásah do jmenovitých parametrů generátoru SM59 byl pouze v případě zkratu a to z toho důvodu, aby ustálený zkratový proud odpovídal hodnotě v MODES. Výkon, díky tomu, že není modelován omezovač dodávky výkonu, je v parametru synchronního stroje změněn na 2,7 MVA. V MODES je právě tento jev zajištěn snížením dodávky výkonu ze spalovacího motoru. Pokud by nebyl činný výkon uměle snížen, byl by ustálený zkratový proud počítán ze jmenovitých parametrů, a dosáhlo by se velké nepřesnosti.

3 Diesel-generátor

Diesel-generátor je zařízení, které se používá pro zajištění dodávky elektrické energie v případech, kdy není energie k dispozici ze sítě. Jedná se o záložní napájecí systém, který asi nebude v dohledné době nahrazen. Primární energii pro přeměnu na elektrickou energii je motorová nafta, výjimečně může být plyn nebo benzin. Diesel-generátor tvoří jeden celek, který se skládá z jednotlivých prvků. Centrálním prvkem je motor spojený přes hřídel se synchronním generátorem, podružnými prvky jsou chlazení a nádrž na palivo. Nevýhodou je dlouhá doba (několik sekund), než začne vyráběnou elektrickou energii napájet nouzový okruh. Tato nevýhoda může být odstraněna, pokud je jako pomocný záložní zdroj použit UPS systém. Hlavní části UPS systému jsou olověné baterie. Pomocí UPS pokryjeme potřebu elektrické energie do té doby, než diesel-generátor je rozběhnut do jmenovitých parametrů. [15]

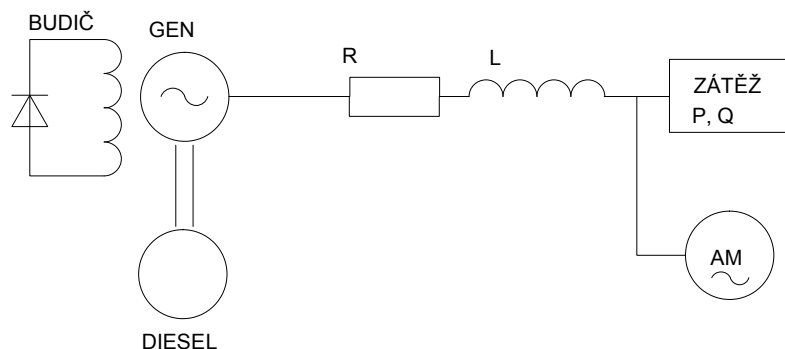
V dnešní době je diesel-generátor součástí elektráren, lodí, ropných plošin, velkých industriálních nebo velkých veřejných budov. Jsou to zejména oblasti, ve kterých je výpadek elektrické energie z jakéhokoli hlediska destruktivní, nebo ohrožující zdraví. [15]

3.1 Projekt DIESEL

Projekt DIESEL je složen z jednotlivých prvků, které jsou uvedeny a detailně popsány v kapitole 2. Pro úplný projekt schází pouze spalovací diesel motor. Jelikož se nejedná o elektrickou součást, nedá se přímo zvolit z databáze programu. Bylo by zapotřebí vytvořit matematický model s respektováním důležitých fyzikálních jevů. DIESEL vychází z ustáleného stavu, který byl řešen jako první příklad. V jednotlivých následujících případech je testováno chování diesel-generátoru v různých přechodných dějích. Speciálními případy jsou rozběhy asynchronního motoru pomocí diesel-generátoru pro stav naprázdno a při zatížení. Zbývající 2 případy nebyly příliš vhodné pro řešení, jelikož se významně uplatňoval vliv spalovacího motoru, který nebyl modelován a zásah automatiky pro brždění při rozběhu.

Simulační model je tvořen synchronním generátorem, který je spojen přes vedení zjednodušeně reprezentováno odporem a indukčností s motorickou zátěží tvořenou asynchronním motorem. Dále je do odběrného uzlu zapojena pasivní zátěž tvořená prvky R a L. Buzení synchronního stroje získává vstupní signály z vnitřních veličin generátoru. Jednotlivé vstupní veličiny jsou pomocí matematických bloků upraveny a přepočítány na poměrné hodnoty, se kterými následně regulátor buzení, omezovač proudu a budič pracují. Výstup budiče je přiveden na vstupní svorku pro buzení synchronního stroje. Kompletní simulační schéma je uvedeno v příloze B.

Vzhledem k tomu, že je v programu EMTP-ATP možno zobrazit si průběhy i některých neelektrických veličin (otáčky, moment) je následně u jednotlivých případů využito této možnosti a porovnáno chování s průběhy v MODES. V případech bez motorické zátěže, budou zobrazeny pouze veličiny U_{GEN} a I_{GEN} , jelikož jsou nejdůležitějšími parametry diesel-generátoru. Z nich jsme následně schopni určit další elektrické veličiny např. (P , Q , S , $\cos\varphi$).



Obr 4.1 Ilustrační model diesel-generátoru s motorickou zátěží

3.2 Parametry jednotlivých bloků

- Generátor

Tab 3-1 Parametry generátoru SM59

| Generátor | U_n (kV) | $\cos\varphi_N$ (-) | S_N (MV·A) | X_d (-) | X_q (-) | X'_q (-) |
|-----------|------------|---------------------|--------------|-------------|-----------|------------|
| | 6,3 | 0,8 | 7,9 | 1,38 | 0,69 | 0,68 |
| | X'_d (-) | X''_d (-) | T'_d (s) | T''_d (s) | T_m (s) | T_q (s) |
| | 0,23 | 0,12 | 6 | 0,06 | 3,58 | 3 |

Časové konstanty: Open
 V ustáleném stavu: Napětí 5144 V (L-G)
 Zátěžný úhel 0°
 Spojení kotvy: trojúhelník
 Moment setrvačnosti (*HICO*): 7171 kg · m² – určen dle vztahu (2.42) z parametrů z Tab 3-1
 Tlumení – DSD, DSR: 2000 N·m/ rad·s⁻¹

- Vedení

Tab 3-2 Parametry vedení

| R_v (Ω) | 0,01 |
|-----------|--------|
| X_v (Ω) | 0,0363 |

- Zátěž

Tab 3-3 Parametry zátěže

| U_z (V) | R_z (Ω) | X_z (Ω) | P_z (MW) | Q_z (Mvar) |
|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|
| 6282 | 13,15 | 17,54 | 3 | 2,25 |

- Motor

Tab 3-4 Parametry výstupních hodnot asynchronního motoru prvky L , R

| Parametry | | Výpočet | Aproximace |
|----------------------|-----------------------|----------|------------|
| Magnetický obvod | $LMUD$ (H) | 0,234507 | 0,264507 |
| | $LMUQ$ (H) | 0,234507 | 0,264507 |
| Statorová indukčnost | L_d (H) | 0,010675 | 0,010675 |
| | L_q (H) | 0,010675 | 0,010675 |
| Rotorová indukčnost | L_{d1} (H) | 0,010675 | 0,012075 |
| | L_{q1} (H) | 0,010675 | 0,012075 |
| | L_{d2} (H) | ----- | 0,004 |
| | L_{q2} (H) | ----- | 0,004 |
| Statorový odpor | R_d (Ω) | 0,272913 | 0,272913 |
| | R_q (Ω) | 0,272913 | 0,272913 |
| Rotorový odpor | R_{d1} (Ω) | 0,354169 | 0,4 |
| | R_{q1} (Ω) | 0,354169 | 0,4 |
| | R_{d2} (Ω) | ----- | 6 |
| | R_{q2} (Ω) | ----- | 6 |

- Budič

Zásah do parametrů budiče byl proveden z důvodů velkého posunu a prodloužení přechodového děje U i I . Poměrné vstupní hodnoty jsou přiváděny s co nejmenší možnou chybou na vstupy regulátoru buzení, omezovače proudů a budiče. I přes tento fakt v obvodech regulátoru buzení a budiče docházelo k odchylkám v řádech desetin. Tyto odchylky ovlivňují, při zavedení zpětné vazby z výstupu budiče do vstupu, amplitudy a fáze v přechodném ději. Na základě těchto nepřesností byla v jednotlivých případech DIESEL změněna velikost parametru k_G zpětné vazby, aby nedocházelo k výraznějším odchylkám U a I . Tato změna byla v souladu s následujícími vztahy, aby byla zachována linearita mezi R_B a U_B . Změnou parametru k_G je eliminována nepřesnost vstupních veličin, nikoliv charakter budiče.

$$k_A \cdot k_G \cdot U_K \gg 1 \quad (3.1)$$

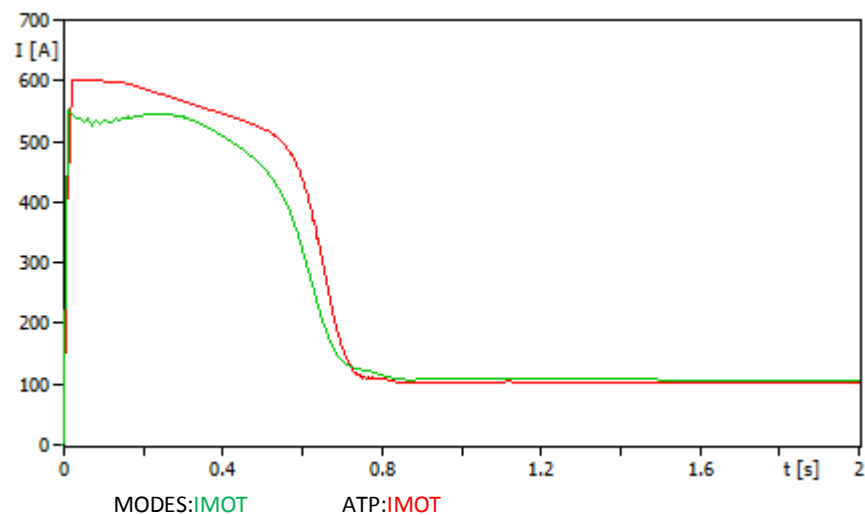
$$U_B = \frac{R_B}{k_G} \quad (3.2)$$

[10]

1. případ – ROZBEHAS

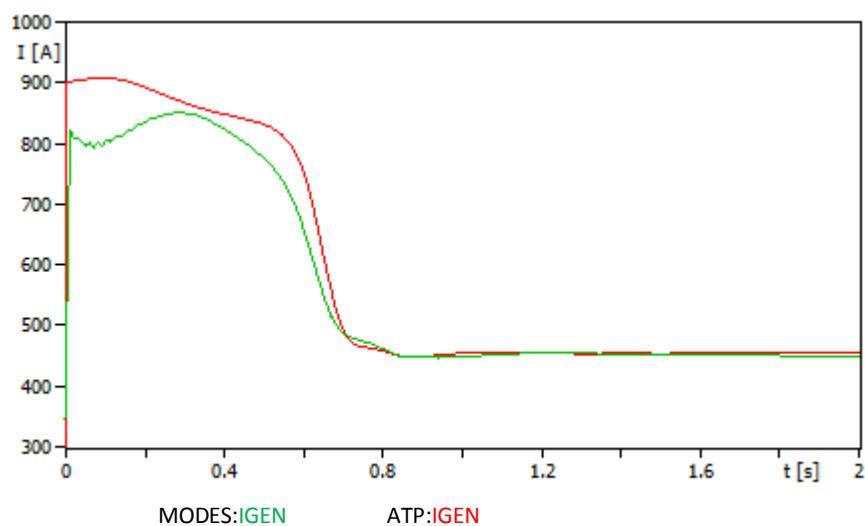
V prvním případě je připojen asynchronní motor k diesel-generátoru pro řešení případu rozběhu se zatížením. Na následujícím obrázku je znázorněna charakteristika rozběhového proudu, ze které lze vidět, že rozběhový proud je 5,5 násobkem proudu jmenovitého. Ve srovnání s průběhem z MODES je odchylka v rozběhové části způsobena nepřesným modelem asynchronního motoru. V ustálené části jsou výsledky simulace shodné. Doba rozběhu je dána velikostí poháněného zařízení. Rozdíl je v tomto případě dán, že zátěž není připínána v závislosti na skluzu, jako je to

v MODES, ale v závislosti na čase. Pokud by model motoru byl shodný s modelem z MODES nezanášelo by toto zjednodušení žádnou odchylku.



Obr 3.1 Průběh proudu asynchronního motoru při rozběhu bez zatížení

Průběh proudu z generátoru je obdobný jako průběh proudu motoru. Ustálená hodnota odpovídá celkové napájené zátěži, kterou tvoří asynchronní motor a pasivní R, L zátěž.



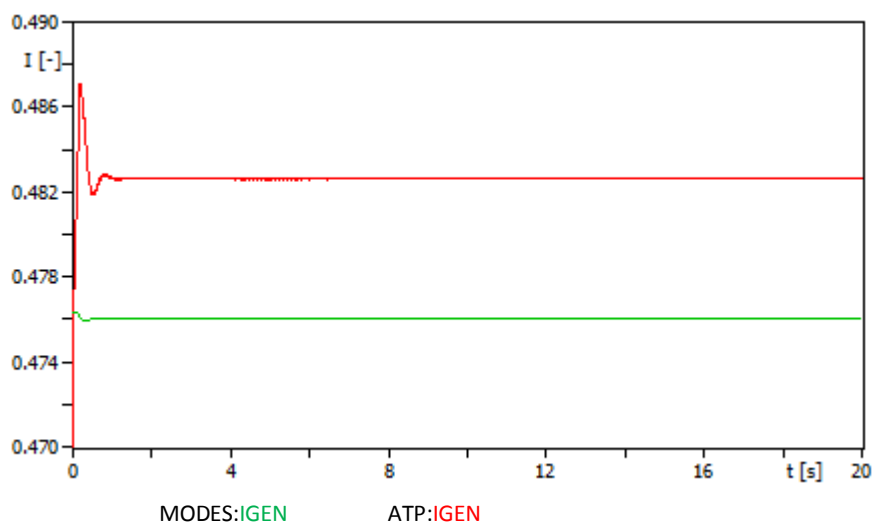
Obr 3.2 Průběh proudu generátoru při rozběhu AM na prázdko

2. případ – USTSTAV

Pro simulaci ustáleného stavu je potřeba v simulačním modelu odpojit zátěž respektovanou asynchronním motorem. Vzhledem k tomu, že je takovou to formou respektován i simulační model v MODES, stejnou formou pro ověření byl vytvořen zásah v EMTP-ATP. V zatížení diesel-generátoru zůstane pouze statická zátěž připojená na svorkách. Pro porovnání modelu diesel-generátoru v ustáleném stavu byly vybrány tyto veličiny I , U , P a Q .

Tab 3-5 Výsledné hodnoty ustáleného stavu projektu DIESEL

| | I_{GEN} (A) | U_{GEN} (V) | P_{GEN} (MW) | Q_{GEN} (Mvar) |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| ATP | 345,2 | 6309,9 | 3 | 2,25 |
| MODES | 345 | 6299,97 | 3 | 2,25 |

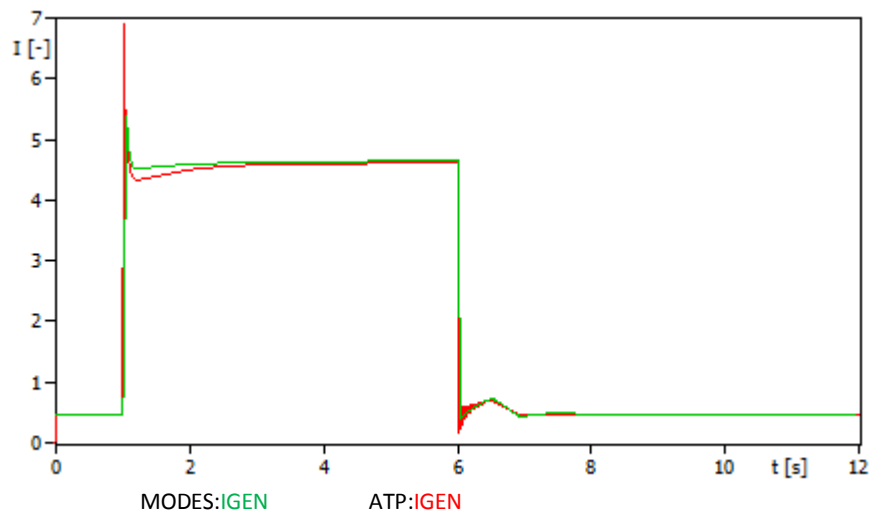


Obr 3.3 Průběh proudů z generátoru v ustáleném stavu

Na proudu v ustáleném stavu z modelu EMTP-ATP (červený průběh) je vidět, že hodnota s relativně velkou přesností odpovídá hodnotě ustáleného proudu z modelu v MODES (zelený průběh). Nepřesnost na řádu tisícín je způsobena nepřesností vstupních údajů do modelu regulátoru buzení a budiče a také zaokrouhlováním a zjednodušováním při výpočtu zatížení. Na počátku průběhu lze vidět přechodný děj. Přechodný děj vznikl na základě inicializace regulátoru buzení na požadovanou hodnotu napětí. Řídicími obvody proběhl pulz, který byl následně zesílen a projevil se na průběhu signálu viditelnou špičkou. Na průbězích ostatních veličin se projevil podobný jev. Ustálený stav není z hlediska simulace příliš zajímavý, ale je velmi důležitý pro následující přechodné stavy. Nepřesnosti v ustáleném stavu mohou mít významný dopad v přechodných dějích, proto je důležité vytvořit velmi přesný model.

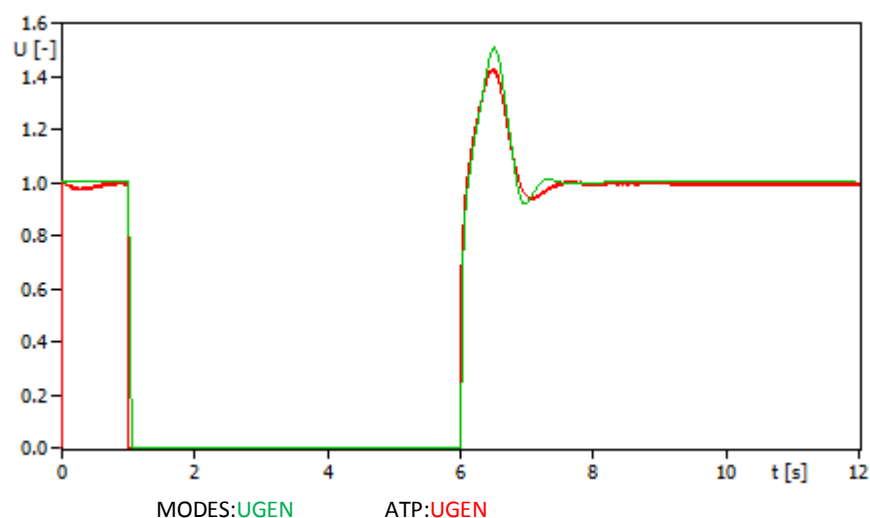
3. případ – ZKRATKOM

Dle scénáře v MODES byl sestaven zásah ve verifikované síti. V čase 1s vznikl třífázový kovový zkrat na svorkách generátoru. Zkrat trvá 5s a poté je vypnut a systém se vrací do předchozího stavu.



Obr 3.4 Průběh proudů z generátoru při zkratu

Na průběhu proudu můžeme pozorovat, že v okamžiku vzniku zkratu proud skokově změní svoji hodnotu a je téměř hned v ustáleném zkratovém stavu. Přechodný děj je potlačen díky rychlému zásahu buzení a v případě MODES snížení dodávky výkonu do diesel-generátoru. Vzhledem k tomu, že systém spalovacího motoru nebyl modelován, byl jmenovitý výkon změněn z hodnoty 7,9MVA na 2,7 MVA. Tímto je zajištěno, že ustálená hodnota zkratového proudu bude počítána přibližně ze stejného výkonu, jaký by byl zajištěn pomocí omezovače dodávky výkonu na hřídeli.

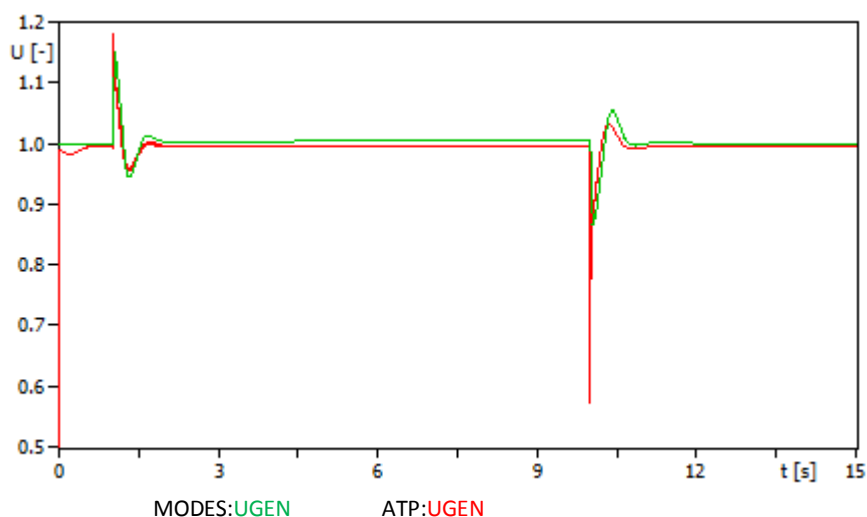


Obr 3.5 Průběh napětí z generátoru při zkratu

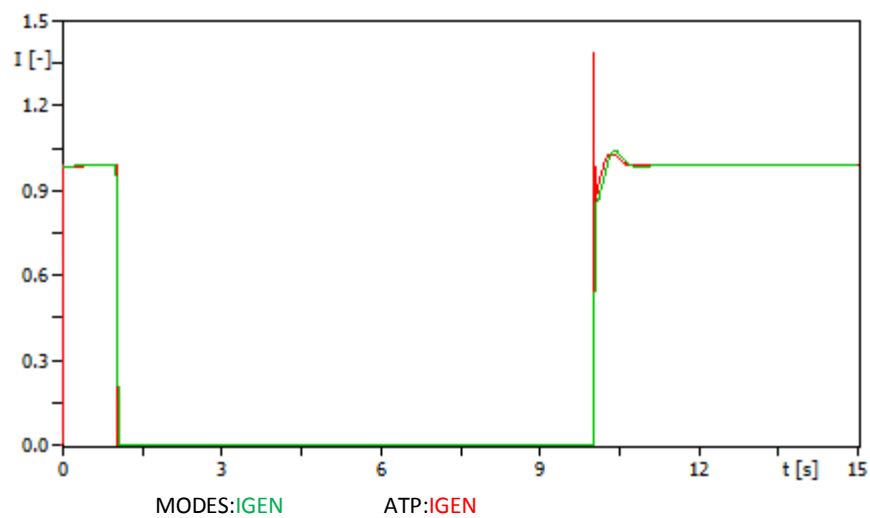
Po zkratu lze vidět, že dojde k novému přechodnému ději, který je způsobený budičem, který se snaží nabudit systém na jmenovitou hodnotu napětí a obnovit dodávku elektrické energie. Z průběhu napětí je zřetelné, že při vzniku zkratu došlo okamžitě k poklesu na nulovou hodnotu. Obnovení napětí doprovázel přechodný děj, který trval 1,98 s. Po této době systém obnovil dodávku elektrické energie. Průběhy proudů a napětí se v obou programech víceméně shodují.

4.případ – SKOKQZAT

SKOKQZAT simuluje vliv skokové změny jalového výkonu. Dle scénáře došlo v 1s k výpadku zátěže jalového a činného výkonu po dobu 9s. Po 9s došlo k obnovení zatížení na původní hodnotu. Z uvedeného průběhu napětí lze vidět, že systém buzení se snažil udržet hodnotu napětí na jmenovité hodnotě. V 1s, kdy došlo k výpadku zatížení, se systém buzení s touto změnou vyrovnal do 1s a přibližně stejnou dobu budič reguloval napětí při obnovení dodávky výkonu. Z průběhu je zřetelné, že i velikost odchylky je pro oba přechodné jevy přibližně stejná pouze otočená.



Obr 3.6 Průběh napětí z generátoru při skokové změně zatížení



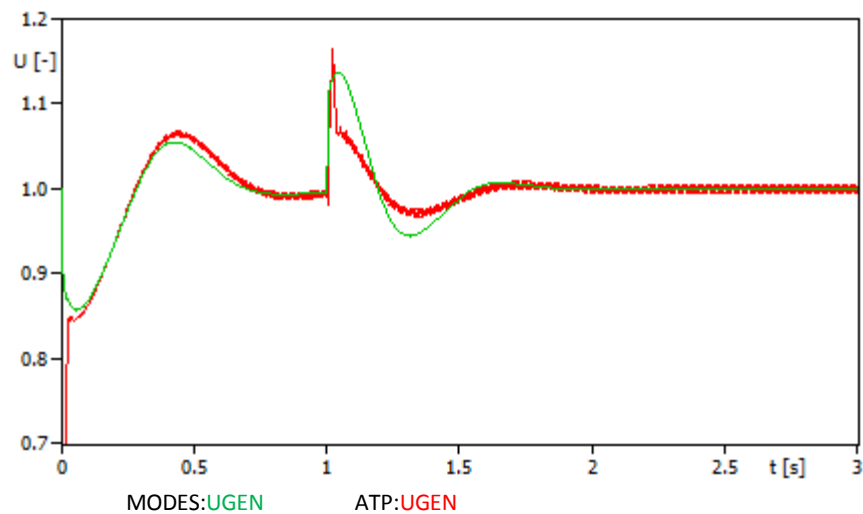
Obr 3.7 Průběh proudů z generátoru při skokové změně zatížení

5.případ – STEPTEST

V případě STEPTEST je řešena problematika skokové změny jalového a činného zatížení v jednom okamžiku. V MODES se případ STEPTEST nepodařil spustit, proto byl vytvořen dle scénáře zásah v případě UST_STAV. Výsledky STEPTEST jsou na následujících obrázcích.

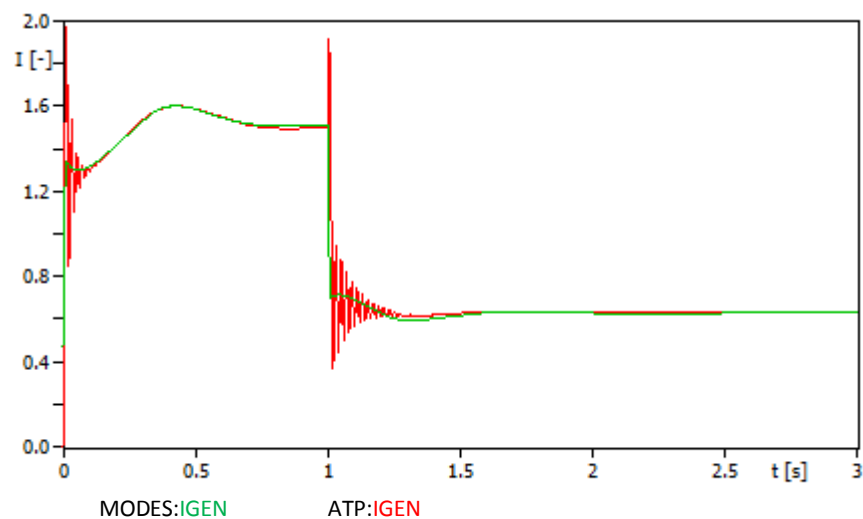
Tab 3-6 Parametry zátěže

| t (s) | R_Z (Ω) | X_Z (Ω) | P_Z (MW) | Q_Z (Mvar) |
|---------|--------------------|--------------------|------------|--------------|
| 0 | 6,86 | 3,85 | 5,75 | 10,24 |
| 1 | 9,99 | 13,33 | 3,95 | 2,96 |



Obr 3.8 Průběh napětí při skokové změně zatížení

Na průběhu napětí lze vidět chování generátoru při změně zátěže. Buzení se na počátku průběhu snaží zvýšit hodnotu napětí na jmenovitou úroveň. Dle přechodného děje se podaří získat jmenovité napětí na svorkách generátoru při definované zátěži po 0,65s. Následně pak v 1s vznikne nový přechodný děj odpovídající novému stavu zatížení. Změna zatížení je opět doprovázena přechodným dějem který se ustálí po 0,75s.

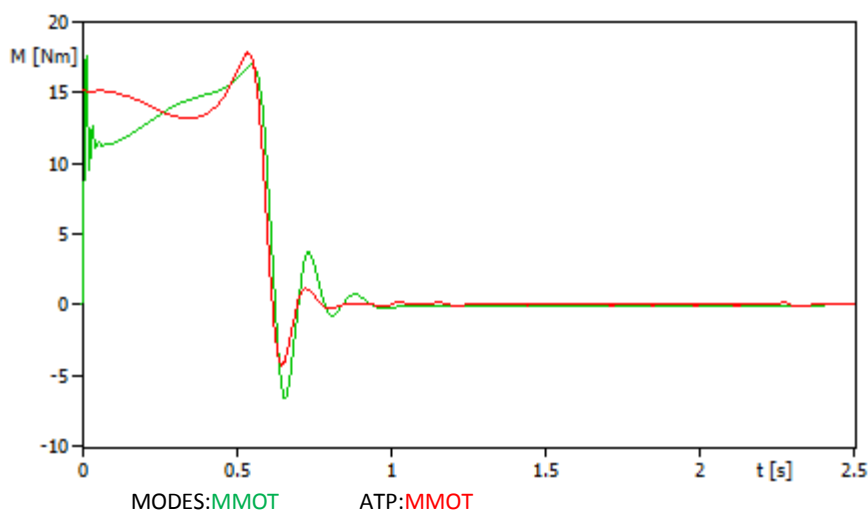


Obr 3.9 Průběh proudu při skokové změně zatížení

Průběh proudu v přechodném ději logicky silně koresponduje s napětím. Doby trvání přechodného děje se odvíjejí od přechodného děje napětí, tedy doby ustálení jsou více méně totožné s dobou ustálení napětí.

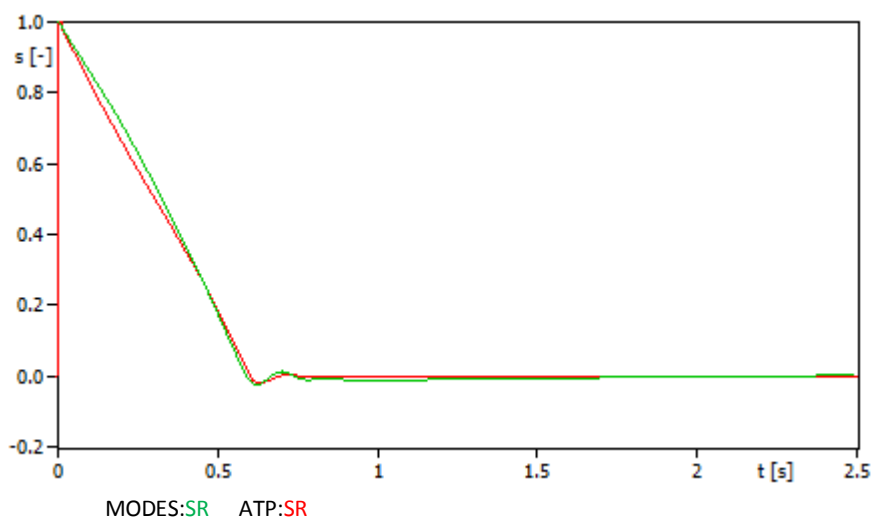
6.případ – ROZBNAPR

V případě byl vytvořený zásah do parametrů asynchronního motoru. Mnou bylo vyřazeno poháněné zařízení. Vytvořil jsem tím model asynchronního stroje nezátíženého na hřídeli. V MODES byl tento případ pojat odlišně. V základním nastavení je vyřazena pasivní zátěž, ale model motoru se ničím neliší od případu ROZBEHAS. Modifikací jsem chtěl poukázat na průběh momentu, který jsem takto mohl zobrazit a porovnat s průběhem z MODES.



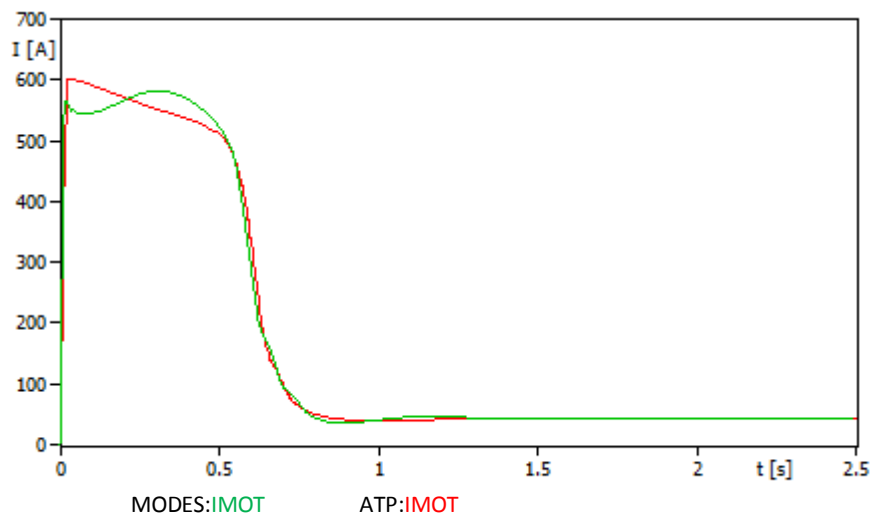
Obr 3.10 Průběh momentu asynchronního motoru při rozběhu

Na průběhu momentu lze vidět značnou odchylku v labilní části momentové charakteristiky. Tato odchylka je dána jinou konstrukcí rotorového obvodu. V pracovní oblasti, až do oblasti ustálení se na hodnotě odpovídající stavu naprázdno, průběh koresponduje s průběhem z MODES.



Obr 3.11 Průběh skluzu asynchronního motoru při rozběhu

Průběh skluzu je v obou softwarech naprosto totožný. Doba rozběhu vlivem mechanických i elektrických prvků je zadána s dostatečnou přesností a na dobu rozběhu i průběh skluzu se nepřesnosti konstrukce rotoru příliš nepodílí.



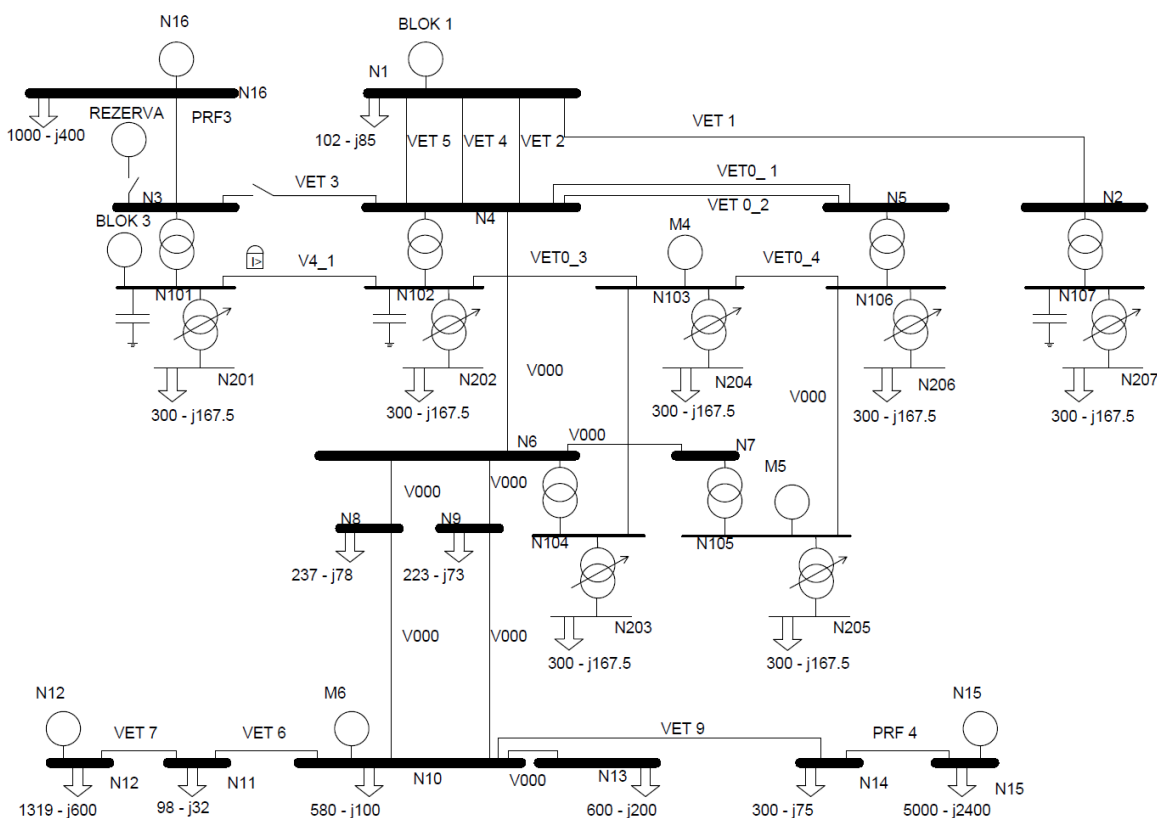
Obr 3.12 Průběh proudu asynchronního motoru při rozběhu

Na průběhu proudu, lze vidět výše opodstatněné chování motoru v oblasti rozběhu. Stejně jako u průběhu momentu je na průběhu proudu vidět odchylka v oblasti labilní části rozběhové charakteristiky. Rozběhový proud motoru má trend dle momentové charakteristiky. Záběrný proud je 5,5 násobkem jmenovitého proudu, jak lze vidět na (Obr 3.12). Vzhledem k tomu, že modelovaný asynchronní motor je se speciální klecí je průběh proudu v počátečním úseku odlišný. Rozběhový proud je v rozběhové části odlišný z důvodů změny RL parametrů rotorového vinutí, které se mění se skluzem motoru. V pracovní části charakteristiky a následně v ustáleném stavu jsou průběhy totožné.

4 Projekt ISLAND

V projektu ISLAND je namodelována francouzsko-belgická elektrizační síť. Síť je tvořena 3 napěťovými hladinami a nachází se zde 8 uzlů s dodávkou elektrické energie. Uzly reprezentující dodávku výkonu jsou rozprostřeny po celé síti a pracují nejen do přenosové sítě, ale také menší z nich do distribuční sítě 150 kV. Zátěže jsou na hladinách 380 kV a 70 kV. Vzhledem k tomu, že zátěže jsou na hladinách vvn a zvn, tak se nejedná o finální zátěž, ale o respektování odběru v uzlu o dané velikosti. Stejně tak ne všech 8 výrobních bloků představuje elektrárnu, ale pouze situaci, že do tohoto bloku je z propojené elektrizační soustavy dodáván uváděný výkon. [4]

Sousední přenosové elektrizační sítě jsou respektovány v uzlech N16, N15 a N12 generátory o aktuálním stavu předávaných výkonů. Největšími zdroji elektrické energie v síti jsou bloky BLOK1 a M6. Ilustrační schéma sítě CIGRE pro simulaci projektu ISLAND je uvedeno na (obr. 4.1) a simulační schéma pro projekt ISLAND je uvedeno v příloze A.[4]



4.1 Prvky sítě

Jednotlivé prvky sítě jsou podrobněji popsány v kapitole 2, a to jak z obecného principu modelování, tak z pohledu konkrétních modelů v MODES a EMTP-ATP. V následujících řádcích jsou tabulkově popsány všechny prvky sítě ISLAND i s konkrétními parametry.

• Generátory

Pro vytváření výrobního bloku byl použit synchronní stroj SM59. I přes jednoznačnost, že některé výrobní bloky jsou zdroji ohromného výkonu např. N15 6,58 GW, jsou všechny modelovány pomocí SM59. V EMTP-ATP nelze propojit generátor se sítí pomocí blokového transformátoru, který by byl bezztrátový. Vzhledem k tomu, že v programu MODES je blokový transformátor reprezentovaný přímo v parametrech generátoru pouze indukční reaktancí, v modelu EMTP-ATP byl tento parametr zanedbán a je sledována pouze velikost napětí v uzlu, do kterého je generátor připojen. Generátory jsou připojeny přímo na síť 400 kV popřípadě 150 kV.

Tab 4-1 Parametry generátorů

| Oblasti | Obl1 | | | | Obl2 | Obl3 | Ostrov | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Název | BLOK1 | M4 | M5 | M6 | N12 | N15 | REZER | N16 | BLOK3 |
| Uzel | N1 | N103 | N105 | N10 | N12 | N15 | N3 | N16 | N101 |
| U_n (kV) | 24 | 15,75 | 15 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 15,75 | 17,5 | 15 |
| $\cos\phi_N$ (-) | 0,864 | 0,867 | 0,867 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,867 | 0,85 | 0,867 |
| S_n (MVA) | 1100 | 130 | 225 | 3995 | 1880 | 6580 | 130 | 1650 | 225 |
| X_d (-) | 2,5 | 1,16 | 2,7 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 1,16 | 2,5 | 2,7 |
| X_q (-) | 2,5 | 0,77 | 2,6 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 0,77 | 2,5 | 2,6 |
| X_d' (-) | 0,425 | 0,42 | 0,36 | 0,425 | 0,425 | 0,425 | 0,42 | 0,425 | 0,36 |
| X_q' (-) | 0,425 | 0,42 | 0,36 | 0,425 | 0,425 | 0,425 | 0,42 | 0,425 | 0,36 |
| X_d'' (-) | 0,3 | 0,25 | 0,29 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,25 | 0,3 | 0,29 |
| X_q'' (-) | 0,3 | 0,25 | 0,29 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,25 | 0,3 | 0,29 |
| X_t (-) | 0,1 | 0,1 | 0,13 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,13 |
| T_d' (-) | 8 | 7,6 | 8,5 | 8 | 8 | 8 | 7,6 | 8 | 8,5 |
| T_d'' (-) | 0,06 | 0,038 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,038 | 0,06 | 0,05 |
| T_q' (-) | 8 | 7,6 | 8,5 | 8 | 8 | 8 | 7,6 | 8 | 8,5 |
| T_q'' (-) | 0,4 | 0,43 | 0,35 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,43 | 0,4 | 0,35 |
| T_m (-) | 12 | 5,75 | 8 | 12 | 12 | 12 | 5,75 | 12 | 8 |

• Transformátory

Transformátor spojuje v síti dva uzly o různé hladině napětí. Určujícím parametrem je tedy převodový poměr mezi těmito uzly. Blok transformátoru byl popsán v kapitole (2.2) včetně vztahů pro určení převodového poměru. V následující tabulce jsou uvedeny vstupní parametry a vypočítaný převodový poměr. Nejsou zde uvedeny absolutní hodnoty napětí v uzlech, jelikož k výpočtu převodového poměru nejsou potřeba. Poměr je určen ze vztažných hodnot napětí.

Tab 4-2 Parametry transformátorů

| Jméno větve | Číslo uzlu | | R_T | X_T | S_{max} | p | I_2 |
|----------------|------------|-------|--------------|--------------|-----------|------|-------|
| | poč. | konc. | (Ω) | (Ω) | (MV·A) | (-) | (A) |
| TS7 | N2 | N107 | 0,135 | 9,8325 | 520 | 2,57 | 1140 |
| TS1 | N3 | N101 | 0,1125 | 9,7875 | 520 | 2,41 | 701 |
| TS2 | N4 | N102 | 0,18 | 10,62 | 520 | 2,40 | 1063 |
| TS6 | N5 | N106 | 0,0675 | 5,0175 | 520 | 2,44 | 1462 |
| TS4 | N6 | N104 | 0,0675 | 4,95 | 520 | 2,45 | 1291 |
| TS5 | N7 | N105 | 0,1125 | 9,7875 | 520 | 2,32 | 905 |
| TD1 | N101 | N201 | 0,0294 | 1,225 | 500 | 2,08 | 2559 |
| TD2 | N102 | N202 | 0,0294 | 1,225 | 500 | 2,06 | 2601 |
| TD4 | N103 | N204 | 0,0294 | 1,225 | 500 | 2,06 | 2635 |
| TD3 | N104 | N203 | 0,0294 | 1,225 | 500 | 2,06 | 2616 |
| TD5 | N105 | N205 | 0,0294 | 1,225 | 500 | 2,08 | 2560 |
| TD6 | N106 | N206 | 0,0294 | 1,225 | 500 | 2,06 | 2597 |
| TD7 | N107 | N207 | 0,0294 | 1,225 | 500 | 2,06 | 2573 |

- **Vedení**

V modelu pasivní prvky R, L představují podélnou impedanci vedení a prvek C příčnou admitanci. V příčné admitanci není brán v úvahu svod vedení. Volba modelu vedení a způsob modelování je popsán v kapitole (2.3). Vstupní údaje pro vedení na jednotlivých hladinách jsou v následujících tabulkách děleny podle napěťové úrovně.

Tab 4-3 Hodnoty RLC prvků vedení pro Π -článek na hladině 150kV

| Jméno větve | Číslo uzlu | | R_V | X_V | B_V | I_{max} |
|----------------|------------|-------|--------------|--------------|-------------|-----------|
| | poč. | konc. | (Ω) | (Ω) | (μS) | (A) |
| V4-1 | N101 | N102 | 3,825 | 14,22 | 51,1 | 19233 |
| V000 | N102 | N103 | 0,225 | 2,565 | 8,9 | 19233 |
| V000 | N103 | N104 | 1,395 | 6,75 | 22,2 | 19233 |
| V000 | N103 | N106 | 1,2375 | 5,625 | 17,8 | 19233 |
| VET0 | N104 | N105 | 1,395 | 6,75 | 22,2 | 19233 |
| V000 | N105 | N106 | 1,8 | 9,675 | 31,1 | 19233 |

Tab 4-4 Hodnoty RLC prvků vedení pro II-článek na hladině 380kV

| Jméno větvě | Číslo uzlu | | R_V | X_V | B_V | I_{max} |
|----------------|------------|-------|--------------|--------------|-------------|-----------|
| | poč. | konc. | (Ω) | (Ω) | (μS) | (A) |
| VET1 | N1 | N2 | 0,01444 | 2,0216 | 11,2 | 15183 |
| VET2 | N1 | N4 | 0,722 | 6,6424 | 39,3 | 15183 |
| VET4 | N1 | N4 | 0,722 | 7,5088 | 44,4 | 15183 |
| VET5 | N1 | N4 | 0,722 | 7,5088 | 44,4 | 15183 |
| VET3 | N3 | N4 | 1,0108 | 11,1188 | 65,7 | 15183 |
| PRF3 | N3 | N16 | 1,8772 | 19,2052 | 93,8 | 2050 |
| V000 | N4 | N5 | 0,722 | 7,0756 | 37,7 | 2156 |
| V000 | N4 | N5 | 0,722 | 7,0756 | 37,7 | 2156 |
| V000 | N4 | N6 | 1,1552 | 10,2524 | 59,8 | 15183 |
| V000 | N6 | N7 | 1,1552 | 10,2524 | 59,8 | 15183 |
| V000 | N6 | N8 | 1,444 | 14,44 | 184,5 | 15183 |
| V000 | N6 | N9 | 1,2996 | 14,2956 | 184,6 | 15183 |
| VET8 | N8 | N10 | 2,166 | 23,104 | 288,5 | 15183 |
| V000 | N9 | N10 | 2,166 | 23,104 | 288,5 | 15183 |
| VET6 | N10 | N11 | 1,1552 | 12,1296 | 68,3 | 15183 |
| V000 | N10 | N13 | 1,444 | 14,44 | 81,8 | 15183 |
| VET9 | N10 | N14 | 1,2996 | 14,0068 | 80,1 | 15183 |
| VET7 | N11 | N12 | 1,8772 | 19,2052 | 93,8 | 2050 |
| PRF4 | N14 | N15 | 3,1768 | 33,3564 | 99,9 | 15183 |

- Zátěže a kompenzační prvky**

V odběrných uzlech je připojena zátěž s činným a jalovým charakterem. Způsob modelování zátěže a kompenzačních prvků v EMTP-ATP a následně určení parametrů respektující odběry P a Q jsou uvedeny v kapitole (2.4). V následujících tabulkách jsou hodnoty odběrů a kompenzačních prvků v uzlech rozděleny dle napěťových hladin.

Na napěťové hladině 70kV:

Tab 4-5 Hodnoty výkonu v odběrových uzlech na hladině 70 kV

| Uzel | P_Z (MW) | Q_Z (Mvar) | Q_C (Mvar) | U_Z (kV) | R_Z (Ω) | X_Z (Ω) | B_c (μS) |
|------|------------|--------------|--------------|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| N201 | 300 | 167 | 45 | 72,837 | 17,684 | 31,768 | 9183,673 |
| N202 | 300 | 167 | 45 | 71,781 | 17,175 | 30,853 | 9183,673 |
| N203 | 300 | 167 | 45 | 71,414 | 16,999 | 30,539 | 9183,673 |
| N204 | 300 | 167 | 45 | 70,095 | 16,778 | 30,140 | 9183,673 |
| N205 | 300 | 167 | 45 | 72,822 | 17,677 | 31,755 | 9183,673 |
| N206 | 300 | 167 | 45 | 71,891 | 17,228 | 30,948 | 9183,673 |
| N207 | 300 | 167 | 45 | 72,479 | 17,511 | 31,456 | 9183,673 |

Na napěťové hladině 380kV:

Tab 4-6 Zátěže v síti na hladině 380kV

| Uzel | Odebíraný činný výkon | Odebíraný jalový výkon | Zadaná hodnota napětí | $R_Z(\Omega)$ | $X_Z(\Omega)$ |
|------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| | P_Z (MW) | Q_Z (Mvar) | U_Z (kV) | | |
| N1 | 102 | 85 | 400 | 1568,627 | 1882,353 |
| N8 | 237 | 78 | 393,692 | 675,106 | 2051,282 |
| N9 | 223 | 73 | 393,797 | 717,489 | 2191,781 |
| N10 | 580 | 100 | 400 | 275,862 | 1600 |
| N11 | 98 | 32 | 399,466 | 1632,653 | 5000 |
| N12 | 1319 | 600 | 400 | 121,304 | 266,6667 |
| N13 | 600 | 200 | 390,026 | 266,667 | 800 |
| N14 | 300 | 75 | 396,701 | 533,333 | 2133,333 |
| N15 | 5000 | 2400 | 400 | 32 | 66,667 |
| N16 | 1000 | 400 | 400 | 160 | 400 |

Na napěťové hladině 150kV:

Kompenzační prostředky jsou umístěny na vybraných 150kV elektrických stanicích. Jedná se tedy o uzly čistě kompenzační N102, N104 a uzly výrobní N101, N105. Kompenzační prostředky jsou v síti modelovány kondenzátorem o požadovaném výkonu. Vzhledem k tomu, že velikost kompenzačního výkonu závisí na velikosti napětí v daném bodě, je kondenzátor vzhledem k napětí značně proměnný. Pokud napětí překročí jmenovitou hodnotu, hodnota dodávaného jalového výkonu v kompenzačním uzlu vzroste. Pokud naopak dojde k poklesu napětí, hodnota dodávky jalového výkonu poklesne. Z hlediska samoregulace se jedná o nestabilní prvek a napěťová charakteristika pro dodávku jalového výkonu je nevhodná. V uzlech N101 a N105 je hodnota napětí držena generátorem pracujícím do sítě. V čistě kompenzačních uzlech může hodnota napětí kolísat, proto je vhodné v síti instalovat hladinové regulátory napětí.

Tab 4-7 Kompenzační prostředky na hladině 150kV

| Uzel | Q_c (Mvar) | B_c (μS) |
|------|--------------|-------------------|
| N101 | 75 | 3333 |
| N102 | 75 | 3333 |
| N104 | 75 | 3333 |
| N105 | 75 | 3333 |

4.2 Výsledky

Dodávka výkonů z generátorů:

Tab 4-8 Přehled dodávky činného a jalového výkonů v programu EMTP-ATP a MODES

| Název GEN | ATP | | MODES | |
|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | P_D (MW) | Q_D (Mvar) | P_D (MW) | Q_D (Mvar) |
| BLOK1 | 1349,40 | 638,94 | 1348,40 | 638,31 |
| BLOK3 | 175,02 | 12,81 | 175,00 | 12,80 |
| M4 | 150,00 | 9,45 | 150,00 | 11,50 |
| M5 | 175,91 | 27,45 | 175,00 | 26,42 |
| M6 | 2800,60 | 491,64 | 2799,80 | 491,10 |
| N12 | 1340,00 | 601,6 | 1340,20 | 601,60 |
| N15 | 4564,30 | 2493,81 | 4565,50 | 2493,70 |
| N16 | 1034,10 | 465,72 | 1034,10 | 467,10 |

Dodávka činného výkonu byla spočítána pomocí matematické procedury TASC, do které byly přivedeny údaje o mechanickém momentu a otáčkách stroje. Jalový výkon byl změřen přímo proudovou sondou, která je schopna určit zdánlivý výkon komplexním číslem. Zároveň touto sondou byla provedena i kontrola dodávky činného výkonu. Odchyly dodávky výkonu v ATP jsou vůči MODES zanedbatelné. Zaznamenané rozdíly v dodávce jalového výkonu na hladině 150kV je pouze u generátoru M4. Rozdíl je dán především tím, že v sousedních uzlech jsou instalovány kompenzační prvky a při jakékoliv odchylce napětí se projeví dodávka jalového výkonu i u generátoru M4.

Výkonové zatížení odběrových uzlů:

Tab 4-9 Přehled zatížení uzlů na hladině 380kV

| Uzel | ATP | | MODES | |
|------|------------|--------------|------------|--------------|
| | P_Z (MW) | Q_Z (Mvar) | P_Z (MW) | Q_Z (Mvar) |
| N1 | 102,00 | 85,00 | 102,00 | 85,00 |
| N8 | 236,91 | 77,97 | 237,00 | 78,00 |
| N9 | 222,91 | 72,97 | 223,00 | 73,00 |
| N10 | 579,99 | 99,99 | 580,00 | 100,00 |
| N11 | 98,00 | 32,00 | 98,00 | 32,00 |
| N12 | 1319,04 | 600,00 | 1319,00 | 600,00 |
| N13 | 600,00 | 200,00 | 600,00 | 200,00 |
| N14 | 300,00 | 75,00 | 300,00 | 75,00 |
| N15 | 5000,00 | 2392,00 | 5000,00 | 2400,00 |
| N16 | 1000,00 | 400,00 | 1000,00 | 400,00 |

Tab 4-10 Přehled zatížení uzlů na hladině 70kV

| Uzel | ATP | | MODES | |
|------|------------|--------------|------------|--------------|
| | P_Z (MW) | Q_Z (Mvar) | P_Z (MW) | Q_Z (Mvar) |
| N201 | 300,00 | 167,00 | 300,00 | 167,00 |
| N202 | 299,97 | 166,98 | 300,00 | 167,00 |
| N203 | 302,94 | 168,63 | 300,00 | 167,00 |
| N204 | 296,43 | 165,00 | 300,00 | 167,00 |
| N205 | 299,70 | 166,99 | 300,00 | 167,00 |
| N206 | 299,92 | 167,00 | 300,00 | 167,00 |
| N207 | 300,00 | 167,00 | 300,00 | 167,00 |

V odběrných uzlech v ATP jsou hodnoty velmi totožné s hodnotami z MODES. V porovnání odběrů mezi napěťovými hladinami 380kV a 70kV jsou přesnější hodnoty na hladině 380kV, jelikož odběry není třeba transformovat na nižší hladinu a tím zanášet chybu v napětí. Na hladině 70kV je nepatrná odchylka v odběrech pouze v uzlu N203 a N204. Částečně to souvisí s dodávkou činného a jalového výkonu z generátoru M4 a částečně také zauzlováním sítě a stékáním proudů z různých částí sítě.

Napětí v jednotlivých uzlech sítě:

Tab 4-11 Napětí v uzlech na hladině 380kV

| Uzel | ATP | | MODES | |
|------|----------|--------------|----------|--------------|
| | U (kV) | $\arg U$ (°) | U (kV) | $\arg U$ (°) |
| N1 | 400,00 | 6,36 | 399,99 | 6,36 |
| N2 | 399,48 | 6,14 | 399,47 | 6,14 |
| N3 | 396,26 | 5,00 | 396,25 | 5,00 |
| N4 | 396,68 | 5,58 | 396,68 | 5,58 |
| N5 | 394,98 | 5,12 | 394,98 | 5,12 |
| N6 | 392,48 | 4,96 | 392,49 | 4,96 |
| N7 | 386,62 | 4,40 | 386,63 | 4,40 |
| N8 | 393,68 | 5,81 | 393,69 | 5,81 |
| N9 | 393,78 | 5,85 | 393,79 | 5,85 |
| N10 | 400,00 | 9,11 | 400,00 | 9,11 |
| N11 | 399,47 | 8,78 | 399,46 | 8,78 |
| N12 | 400,00 | 8,92 | 400,00 | 8,92 |
| N13 | 390,03 | 6,03 | 390,02 | 6,03 |
| N14 | 396,70 | 5,37 | 396,70 | 5,37 |
| N15 | 400,00 | 0 | 400,00 | 0 |
| N16 | 400,00 | 5,19 | 400,00 | 5,19 |

Tab 4-12 Napětí v uzlech na hladině 150kV

| Uzel | ATP | | MODES | |
|------|----------|--------------|----------|--------------|
| | U (kV) | $\arg U$ (°) | U (kV) | $\arg U$ (°) |
| N101 | 157,90 | 1,16 | 157,90 | 1,16 |
| N102 | 154,22 | -0,31 | 154,22 | -0,31 |
| N103 | 152,59 | -0,25 | 152,59 | -0,26 |
| N104 | 153,46 | 0,82 | 153,50 | 0,83 |
| N105 | 157,87 | 0,93 | 157,87 | 0,93 |
| N106 | 155,44 | 0,81 | 155,44 | 0,81 |
| N107 | 155,59 | -0,62 | 155,59 | -0,62 |

Tab 4-13 Napětí v uzlech na hladině 70kV

| Uzel | ATP | | MODES | |
|------|----------|--------------|----------|--------------|
| | U (kV) | $\arg U$ (°) | U (kV) | $\arg U$ (°) |
| N201 | 72,84 | -2,65 | 72,84 | -2,65 |
| N202 | 71,78 | -4,24 | 71,78 | -4,24 |
| N203 | 71,35 | -3,19 | 71,41 | -3,13 |
| N204 | 70,99 | -4,21 | 70,99 | -4,27 |
| N205 | 72,82 | -2,88 | 72,82 | -2,88 |
| N206 | 71,88 | -3,10 | 71,88 | -3,10 |
| N207 | 72,48 | -4,47 | 72,48 | -4,47 |

Proudy ve vedeních na hladině 380 kV, 150 kV:

Tab 4-14 Proudy ve větvích na hladině 380 kV

| Název větve | Uzel | | ATP | MODES |
|----------------|------|-----|--------------|--------------|
| | Z | Do | <i>I</i> (A) | <i>I</i> (A) |
| VET1 | N1 | N2 | 458 | 459 |
| VET2 | N1 | N4 | 547 | 547 |
| VET4 | N1 | N4 | 484 | 484 |
| VET5 | N1 | N4 | 484 | 484 |
| VET3 | N3 | N4 | 209 | 209 |
| PRF3 | N3 | N16 | 109 | 109 |
| V000 | N4 | N5 | 291 | 291 |
| V000 | N4 | N5 | 291 | 291 |
| V000 | N4 | N6 | 332 | 331 |
| V000 | N6 | N7 | 386 | 387 |
| V000 | N6 | N8 | 240 | 240 |
| V000 | N6 | N9 | 255 | 255 |
| VET8 | N8 | N10 | 596 | 596 |
| V000 | N9 | N10 | 589 | 589 |
| VET6 | N10 | N11 | 111 | 112 |
| V000 | N10 | N13 | 930 | 931 |
| VET9 | N10 | N14 | 1076 | 1077 |
| VET7 | N11 | N12 | 39 | 39 |
| PRF4 | N14 | N15 | 647 | 648 |

Tab 4-15 Proudy ve větvích na hladině 150 kV

| Název větve | Uzel | | ATP | MODES |
|----------------|------|------|--------------|--------------|
| | Z | Do | <i>I</i> (A) | <i>I</i> (A) |
| V4-1 | N101 | N102 | 212 | 213 |
| V000 | N102 | N103 | 367 | 368 |
| V000 | N103 | N104 | 250 | 256 |
| V000 | N103 | N106 | 340 | 341 |
| VET0 | N104 | N105 | 371 | 368 |
| V000 | N105 | N106 | 204 | 201 |

5 Srovnání modelů projektů MODES a EMTP-ATP

Celá práce se nese v koncepci komparace MODES a EMTP-ATP. Na vybraných dvou projektech je zobrazena schopnost obou programů zpracovávat stejný problém. Vzhledem k odlišnému přístupu ke vstupním datům, došlo k určitým odchylkám. Nelze jednoznačně určit, který software je lepší, ale lze pouze zhodnotit výsledky poskytnuté oběma programy.

Z pohledu projektu ISLAND, kde byl vytvořený ustálený stav s respektováním všech prvků sítě, je evidentní naprostý soulad obou programů. Hodnoty napětí i proudů stejně jako bilance výkonů jsou v obou programech až na minimální odchylky totožné. Odchylky jsou způsobeny nepřesností přepočítaných parametrů a zaokrouhlováním viz kapitola (4.2). V ustáleném stavu, lze říci, že pokud se v modelech zanedbají parametry např. rázová reaktance, přechodná reaktance, časová konstanta přechodného děje, tak tyto nemají žádný vliv na výsledky simulace. Dosažení shody v projektu ISLAND bylo snadnější záležitostí, než v projektu DIESEL, jelikož se daná síť verifikovala pouze z pohledu ustáleného stavu. S tím souvisí i odchylky v obou projektech. Navzdory některým nepřesnostem jsou oba modely dotaženy do optimálních výsledků, přičemž chyba v jednotlivých simulačních modelech je velmi malá, řádově v jednotkách procent. Výjimkou jsou pouze případy v projektu DIESEL, zejména jde o rozběh asynchronního motoru. Zde nebylo možno model motoru vytvořit na základě vstupních dat s využitím předdefinovaných bloků v EMTP-ATP viz kap (2.5).

V projektu DIESEL, kde je testován diesel-generátor, je rovněž ustálený stav s minimální odchylkou. Rozdíly jsou až v přechodných stavech sítě napájené diesel-generátorem. Zásadní je přístup při tvorbě projektu. Již zde nastávají první rozdíly. V EMTP-ATP nebyl modelován spalovací diesel motor. Vzhledem k náročnosti modelu mechanických a spalovacích částí dieselu není vhodný tento blok vytvářet v programu EMTP-ATP, jelikož možnosti programu jsou významně omezeny. Pro elektrické parametry je naopak program vybavený už v základních blocích velkou škálou možností. Oblasti buzení a regulace buzení byl proto věnován větší prostor. Z pohledu komparace obou programů dochází k další odchylce, která je způsobena zpracovávaným signálem. Vstupem do řídicí části je potřeba přivádět signál v poměrných efektivních hodnotách, protože MODES při výpočtu pracuje s poměrnými efektivními hodnotami. V EMTP-ATP je každý signál v okamžitých hodnotách. Pro řídicí části je tedy nejprve nutné tento signál upravit a poté přivádět na vstupy řídicích obvodů. Při úpravě potřebného signálu dochází k zaokrouhlení a v případě výpočtu efektivní hodnoty také k odchylkám při inicializaci signálů. S těmito nedokonalostmi je projekt v EMTP-ATP verifikován s projektem v MODES.

Na průbězích v jednotlivých případech lze vidět, že k zásadnějším rozdílům nedocházelo, až na malé odchylky v amplitudách při přechodných dějích. Zde je důležité upozornit na povahu programu MODES, který je dominantní při středně rychlých (elektromechanických) a pomalých (termodynamických) přechodných dějích. Naopak program EMTP-ATP je více zaměřený na přechodné děje velmi rychlé (vlnové) a rychlé (elektromagnetické). Z tohoto pohledu lze říci, že se jedná o charakterově odlišné programy. EMTP-ATP respektuje v delším sledovacím čase i elektromechanické přechodné děje, ale neprovádí výpočet v reálném čase, zatím co MODES ano.

Dalším významnějším bodem při tvorbě jednotlivých bloků byl model asynchronního motoru. Rozdíly při tvorbě jsou popsány v kapitole 2. Z pohledu přechodných dějů v elektrizačních soustavách jsou zásadními prvky právě elektrické točivé stroje. Při přechodných dějích v nich vznikají děje jak elektromagnetické, tak elektromechanické v závislosti na délce simulačního času. [4], [14], [18]

Projekty 3W_TRANS a REG_STAB modelované v MODES nelze přímo verifikovat v ATP. ATP nenabízí možnost jak za provozu plynule přepínat odbočky transformátorů. Vzhledem k tomu, že je v ATP možnost si bloky nadefinovat pomocí procedury MODELS je možné i tyto projekty verifikovat pomocí ATP. Ostatní projekty je možno více méně verifikovat za pomoci již definovaných prvků. Způsoby jak modelovat budící systémy lze najít v kap 2.6. Simulování turbín je další kapitolou, která zasluží větší pozornost. Jednoduššími projekty pro verifikaci jsou dle mého úsudku projekty NESYMETR a PHASE_VAL. Z velké části jsou zde řešeny učebnicové případy poruch na vedení. Z pohledu rozsahu a propracovanosti se mi jako nejobtížnější projekty jeví ISLAND, MIDDLE a LONG. V těchto projektech je mimo základní síťové prvky modelováno mnoho regulačních a řídicích prvků pro ochrany a automatiky. [11], [12], [13]

Závěr

V diplomové práci jsou zpracovány simulační obvody elektroenergetické přenosové sítě a diesel-generátoru. Práce je vedena jako verifikační proces projektů vytvořených v síťovém simulátoru MODES do obvodového simulátoru EMTP-ATP. Jednotlivě jsou rozebrány všechny prvky elektrizační soustavy, které byly pro verifikační modely nutné vytvořit. Jsou zde rozebrány přístupy v modelování synchronních generátorů, transformátorů, vedení a zátěže v obou programových prostředích. Pro úplný model diesel-generátoru bylo třeba vytvořit regulační a budící obvody pro generátor. V kapitolách 3 a 4 jsou výsledky ze simulací obou projektů. Pro projekt diesel-generátoru jsou výsledky v grafické podobě, jelikož se jedná o přechodné jevy při poruchách či manipulaci v obvodu. V projektu ISLAND jsou výsledky tabulkově, vzhledem k velkému množství dat. Projekt ISLAND byl verifikován pouze pro ustálený stav.

Verifikační procesy jsou v technice obecně velmi potřebnou záležitostí k ověření správné funkčnosti projektů. Přístup k verifikaci může být odlišný, ale význam je vždy stejný. Verifikovat můžeme měření, simulacemi v jiném softwaru, či praktickým výpočtem, kterým podložíme výsledky. Úspěšně verifikované projekty lze brát za správné a můžeme v nich provádět různé zásahy, ve kterých můžeme testovat potřebné stavy. Simulační software MODES je široce používán provozovatelem přenosové soustavy ČEPS a.s. pro simulování přechodných dějů v praktických problémech, zejména pro analýzy provozních stavů přenosové soustavy v rámci rozvoje a řízení přenosové soustavy, ale také pro výukové účely či vědecké semináře. EMTP-ATP je celosvětově rozšířený software, na jehož vývoji se podílí odborníci z celého světa. Software je zejména využíván pro edukační účely ve školství či pro vědecké semináře. Oba softwary jsou vyvíjeny již přes 20 let a vzájemné verifikace jsou častou záležitostí. Obecně při simulacích dochází k výrazným shodám, lze tedy tvrdit, že co do významu jsou oba softwary kvalitním prostředím pro simulace v elektrotechnice. V diplomové práci jsem došel k významné shodě při simulacích obou projektů. Mohu tedy tvrdit, že simulační modely jsou vytvořeny správně. Jedinou nevýhodou při zpracování projektů byla vstupní data pro modely prvků sítě. Vzhledem k odlišnosti simulačních bloků asynchronního motoru nebylo možné vytvořit souhlasný model. Pro detailní model by bylo třeba získat katalogové údaje a parametry nebo křivky z měření.

Pro úplnost je vhodné doplnit, že v elektrotechnice existuje velká škála simulačních softwarů. Podstata každého z nich je více méně obdobná jen s tím rozdílem, že každý se specializuje na určitou oblast elektrotechniky. Z mého pohledu je nejuniverzálnějším softwarem MATLAB. Nejedná se o specifikovaný typ elektrotechnického programu, ale z matematického pohledu je nejotevřenější. Pro simulace nabízí nadstavbu SIMULINK, která je pro potřeby simulace nejen elektrických obvodů, strojů a sítí dostatečná, ale také je zde možnost simulovat cokoliv z fyzikální či matematické oblasti.

Rozvinutím řešené problematiky by mohlo být doplnění sítě CIGRE v projektu ISLAND o modely turbín ke všem výrobním blokům v síti a dále i modely automatik a ochran pro chránění a řízení sítě v kritických stavech soustavy. V případě ISLAND by pak mohl být verifikován přechod do ostrovního režimu v otáčkové regulaci turbíny a následně za pomoci automatik přifázování k tvrdé síti. V případě projektu DIESEL by bylo vhodné zpřesnit simulaci rozběhu asynchronního motoru,

tím, že by byly zadány požadované vstupní parametry pro model bloku asynchronního motoru. V případě štítkových údajů nebo katalogových hodnot kde nejsou uvedeny hodnoty odporů a indukčností vinutí v rotorových souřadnicích, by bylo vhodné provést přepoččet pomocí Parkovy transformace do d, q souřadnic.

Literatura:

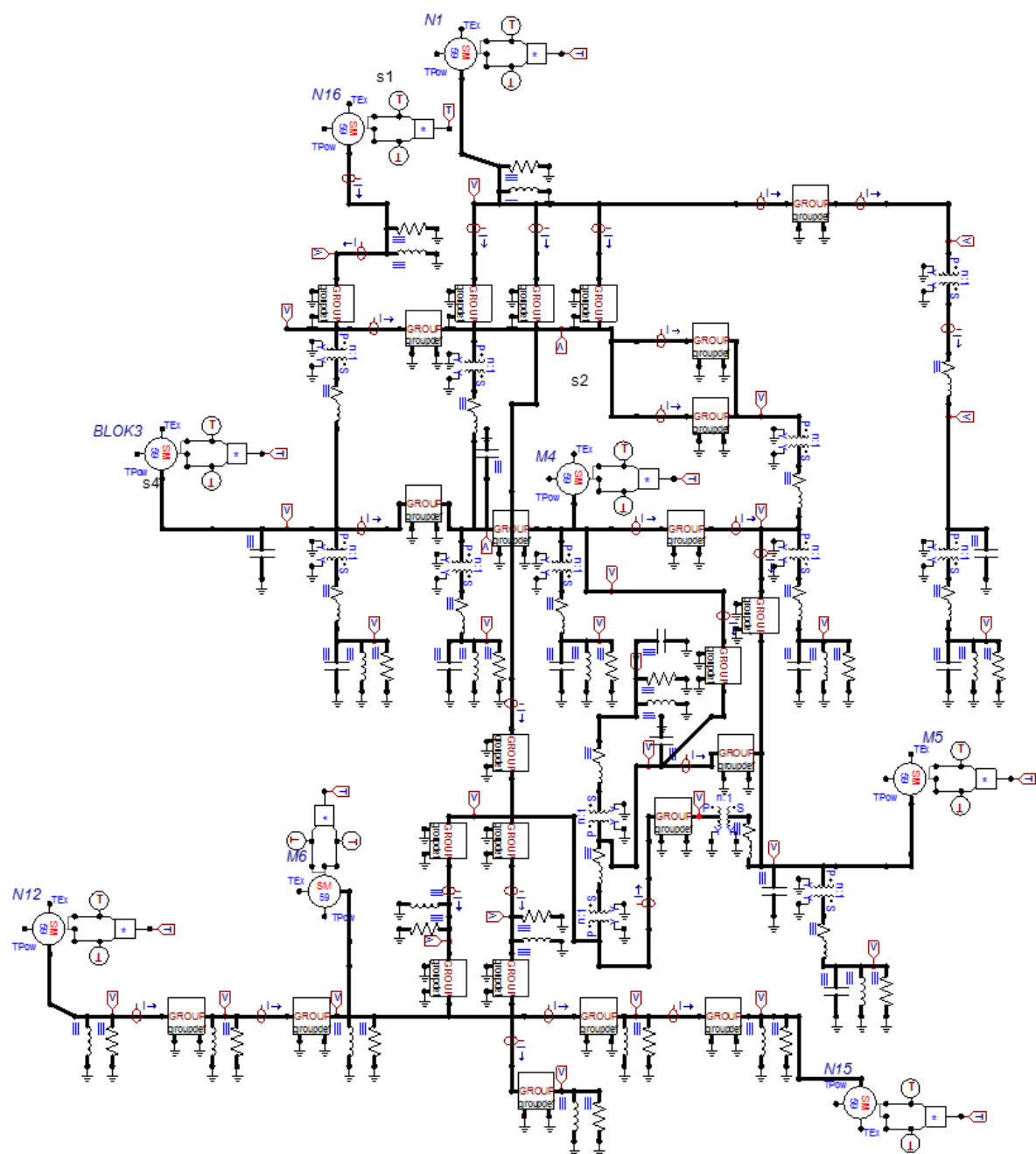
- [1] ATP/EMTP Rule Book, Canadian-American EMTP Users Group
- [2] ATPDraw for Windows 3.1 User's Manual: Lázlo Pirkler, Hans Kr. Hoidalen; 1998
- [3] ALTUS, J. *Modelovanie a výpočty elektrických sietí I. Výpočty ustáleného chodu sústavy*, EDIS Žilina, Žilina, 2005, AAB, str.: 115 stran, ISBN 80-8070-380-9
- [4] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha] : Asociace energetických manažerů, 2013. 272 s. ISBN 978-80-260-4461-1
- [5] RUSEK, Stanislav. *Teoretická elektroenergetika: učební texty*. VŠB-TUO, 2002
- [6] RUSEK, Stanislav. *Řízení elektrizačních soustav: učební texty*. VŠB-TUO, 2001
- [7] MÁŠLO, Karel. *Model asynchronního motoru pro dynamické výpočty*. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/ref12_Asmotor.pdf
- [8] Přechodné děje v elektrizačních soustavách. MACH, Veleslav. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/1uvod.html>.
- [9] MÁŠLO, Karel. *Používání programu MODES pro výpočet přechodných dějů v elektrizační soustavě: Uživatelská příručka programu MODES 2.2*. 2001.
- [10] MÁŠLO, Karel. *Popis modelování přechodných dějů v ES MODES*. 2001
- [11] MÁŠLO, Karel. *Průvodce použitím programu MODES při analýze dynamického chování elektrizační soustavy 1.díl: Metodický průvodce programem MODES*. 2001.
- [12] MÁŠLO, Karel. *Základní přehled používání a ukázkových projektů: Metodický průvodce programem MODES*. 2001.
- [13] MÁŠLO, Karel. *Průvodce použitím programu MODES při analýze dynamického chování elektrizační soustavy 2.díl: Metodický průvodce programem MODES*. 2001.
- [14] MACH, Veleslav. *Diagnostické metody a modelování na zařízení v elektrárnách*. Sylabus. VŠB-TUO. 2001
- [15] KUČHTA, Karel. *Dimenzování a konfigurace dieselgenerátoru*. [online]. 2009 [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/dimenzovani-a-konfigurace-dieselgeneratoru>
- [16] REPORT, IEEE. Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* [online]. 1981, PAS-100, issue 2, s. 494-509 [cit. 2015-02-09]. DOI: 10.1109/tpas.1981.316906.
- [17] MÁŠLO, Karel. *Tabulky s popisem parametrů*
- [18] NEUMAN, Petr. *Modelování přechodových elektromagnetických dějů v elektrizační soustavě pro účely simulace kritických stavů*. [online]. [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB07/prispevky/neuman_p/neuman_p.pdf
- [19] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04940-2

Seznam příloh

Příloha A: Simulační schéma sítě CIGRE v projektu ISLAND

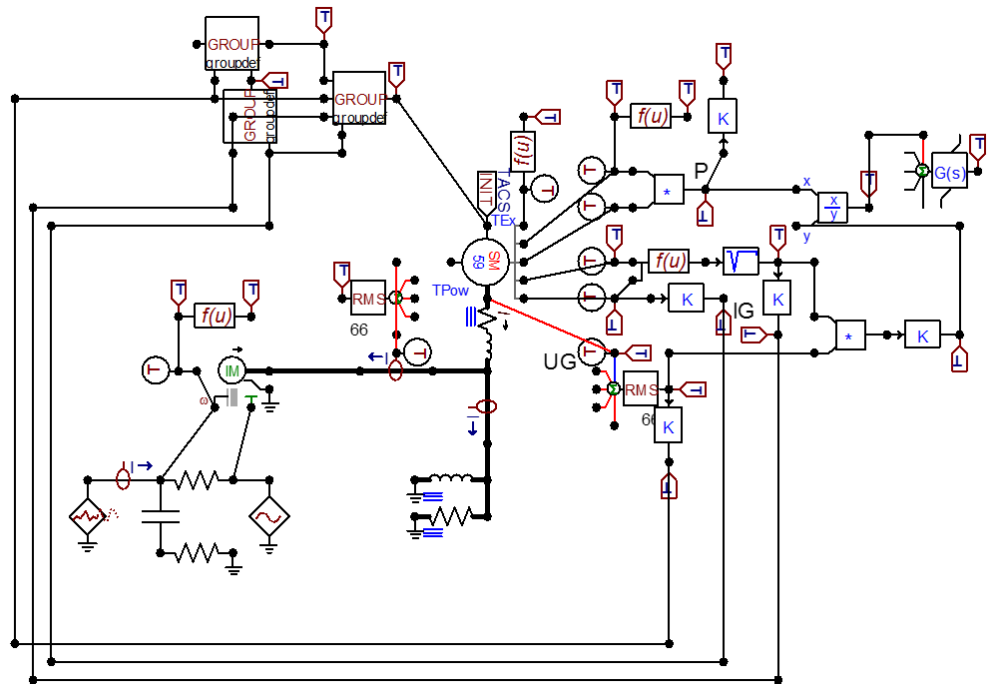
Příloha B: Simulační schémata projektu DIESEL

Příloha A: Simulační schéma sítě CIGRE v projektu ISLAND



Příloha B: Simulační schémata projektu DIESEL

- S pasivní zátěží a asynchronním motorem



- S pasivní zátěží

